

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»,
освітньо-професійними програмами «Електричні машини і апарати»,
«Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Електричні апарати: Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Електричні машини і апарати», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, Є. О. Троценко. – Електронні текстові дані (1 файл: 6,31 МБайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 98 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 31.01.2020 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 6 від 27.01.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі:	<i>Бржезицький Володимир Олександрович</i> , д-р техн. наук, проф. <i>Гаран Ярослав Олександрович</i> , канд. техн. наук, асист. <i>Троценко Євгеній Олександрович</i> , канд. техн. наук, доц.
Відповідальний редактор	<i>Проценко О. Р.</i> , кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки
Рецензент	<i>Васьковський Ю. М.</i> , доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки

Лабораторний практикум з дисципліни «Електричні апарати» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійних програм «Електричні машини і апарати», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» призначений для поглибленого засвоєння студентами матеріалів курсу лекцій з даної дисципліни, одержання практичних навичок роботи з високовольтними та низьковольтними електричними апаратами, діагностування та контролю їх стану, дослідження особливостей їх роботи в реальних умовах, визначення факторів, що впливають на роботу електричних апаратів та методів регулювання впливу цих факторів. Лабораторний практикум розрахований на виконання в комп'ютерному класі та на спеціалізованих лабораторних стендах кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Дослідження струмів короткого замикання у вимикачах високої та низької напруги	5
Дослідження на комп'ютерній моделі електродинамічних сил взаємодії між паралельними провідниками у разі змінного струму короткого замикання ..	21
Діагностування стану ізоляції високовольтного трансформатора на основі вимірювання нормограм та дефектограм	48
Дослідження імпульсної електричної міцності ізоляційних проміжків високовольтних електричних апаратів	61
Дослідження перенапруг на контактах вимикача при відключенні електричної мережі	77
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	97

ВСТУП

Навчальним планом здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітньо-професійні програми «Електричні машини і апарати», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси») передбачено виконання циклу лабораторних робіт з дисципліни «Електричні апарати», які присвячені окремим розділам лекційного курсу даної дисципліни та пов'язані з дослідженням функціонування окремих вузлів електричних апаратів та режимів їх роботи, діагностуванням та контролем стану, визначенням гранично допустимих умов роботи електричних апаратів, моделюванням роботи електричних апаратів за допомогою відповідного програмного забезпечення на персональних комп'ютерах.

Мета проведення циклу лабораторних робіт – закріплення основних теоретичних положень, одержаних в лекційному курсі з даної дисципліни, ознайомлення студентів з будовою електричних апаратів, одержання студентами практичних навичок розрахунку параметрів вузлів електричних апаратів, вибору, у відповідності до вимог експлуатації, окремих типів електричних апаратів, визначення відповідності вимогам експлуатації режимів їх роботи, набуття практичного досвіду визначення факторів, що впливають на роботу електричних апаратів.

Лабораторний практикум складається з 5 лабораторних робіт, кожна з яких містить теоретичні відомості, необхідні для підготовки до її виконання, опис установки та методики виконання роботи, а також контрольні питання, що визначають засвоєні студентами знання та одержаний досвід.

Лабораторна робота № 1

Дослідження струмів короткого замикання у вимикачах високої та низької напруги

з дисципліни «Електричні апарати» (4 академічні години)

Мета роботи: дослідити розвиток та параметри струмів короткого замикання у вимикачах високої та низької напруги та їх зв'язок з параметрами вимикачів.

Теоретичні положення

1. Поняття примусових та вільних струмів і напруг

Стан електричного кола в будь-який момент часу визначається кількістю електромагнітної енергії, що є у окремих елементах кола. Зобразимо мережу з постійними параметрами у вигляді еквівалентного кола, яке складається з трьох послідовних ділянок r , L , C (рис. 1.1), до яких прикладена синусоїдна напруга:

$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta), \quad (1.1)$$

де θ – фазовий кут для моменту часу $t = 0$.

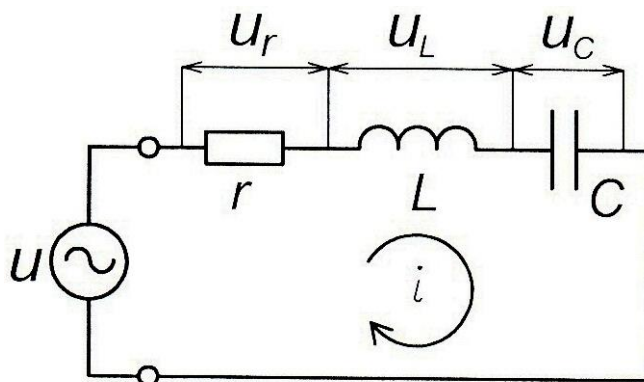


Рисунок 1.1 – Напруги і струм у електричному колі з послідовно з'єднаними активним опором r , індуктивністю L , ємністю C

Тоді для будь-якого моменту часу t після вмикання напруги згідно із законом Кірхгофа маємо:

$$u = u_r + u_L + u_C, \quad (1.2)$$

де $u_r = r \cdot i$ – падіння напруги на активному опорі r , $u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$ – напруга на індуктивності L , $u_C = \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt$ – напруга на ємності C .

Звичайно, рівняння (1.2) записують у вигляді:

$$u = r \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt. \quad (1.3)$$

Після закінчення перехідних процесів у колі наступає сталий режим зі струмом, який називають примусовим i_{np} , тому у сталому режимі рівняння (1.2) набуває вигляду:

$$u = r \cdot i_{np} + L \cdot \frac{di_{np}}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int i_{np} \cdot dt. \quad (1.4)$$

Суттєво, що під час перехідного процесу змінюються запаси енергії у L і C , в результаті чого у колі проходить струм, який називають вільним i_B .

Оскільки в умовах електропередач генератор можна вважати потужним з внутрішнім опором $Z_r = 0$, то проходження вільного струму не створює на ньому відповідного падіння напруги. Тому рівняння (1.3) приймає вигляд:

$$0 = r \cdot i_B + L \cdot \frac{di_B}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int i_B \cdot dt. \quad (1.5)$$

При проходженні i_B через r частина енергії перетворюється в тепло, в результаті вільний струм закінчується, коли запаси енергії у L і C досягають усталених («нульових») значень.

З рівнянь (1.3-1.5) безпосередньо маємо:

$$i = i_{PP} + i_B. \quad (1.6)$$

Тоді для всього кола і для падінь напруги на окремих його ділянках справедливе співвідношення:

$$u = u_{PP} + u_B. \quad (1.7)$$

Метод аналізу та обчислення перехідних процесів у електричних колах з використанням понять повних, примусових та вільних струмів і напруг називається класичним.

2. Властивості струмів короткого замикання

Розглянемо випадок, коли на лінії, що знаходиться в роботі і забезпечує нормальну роботу споживача енергії, раптово виникає «металеве» глухе коротке замикання (падіння проводу на металеву заземлену траверсу, руйнування штирового ізолятора із з'єднанням його штиря з проводом тощо).

2.1. Загальні відомості

Найчастіше ЛЕП описують П-подібною еквівалентною схемою (рис. 1.2, а), яка, з одного боку, приєднана до потужного генератора Γ з внутрішнім опором z_z та е.р.с. \dot{E} , а з другого боку – до опору навантаження Z_{HAB} . У цьому випадку параметри лінії дорівнюють:

- 1) індуктивність $L_{\mathcal{L}} = L_0 \cdot l$;
- 2) ємність $C = C_0 \cdot l$, причому ця ємність складається в свою чергу з двох ємностей $\frac{C_L}{2}$, які приєднані до обох кінців лінії;
- 3) опір проводів $R = R_0 \cdot l$;
- 4) опір витоку вздовж ізоляції $R_{iz} = \frac{1}{g_{iz}} = \frac{1}{g_0 \cdot l}$,

де L_0 , C_0 , R_0 , g_0 - відповідно питомі параметри лінії, а l – її довжина.

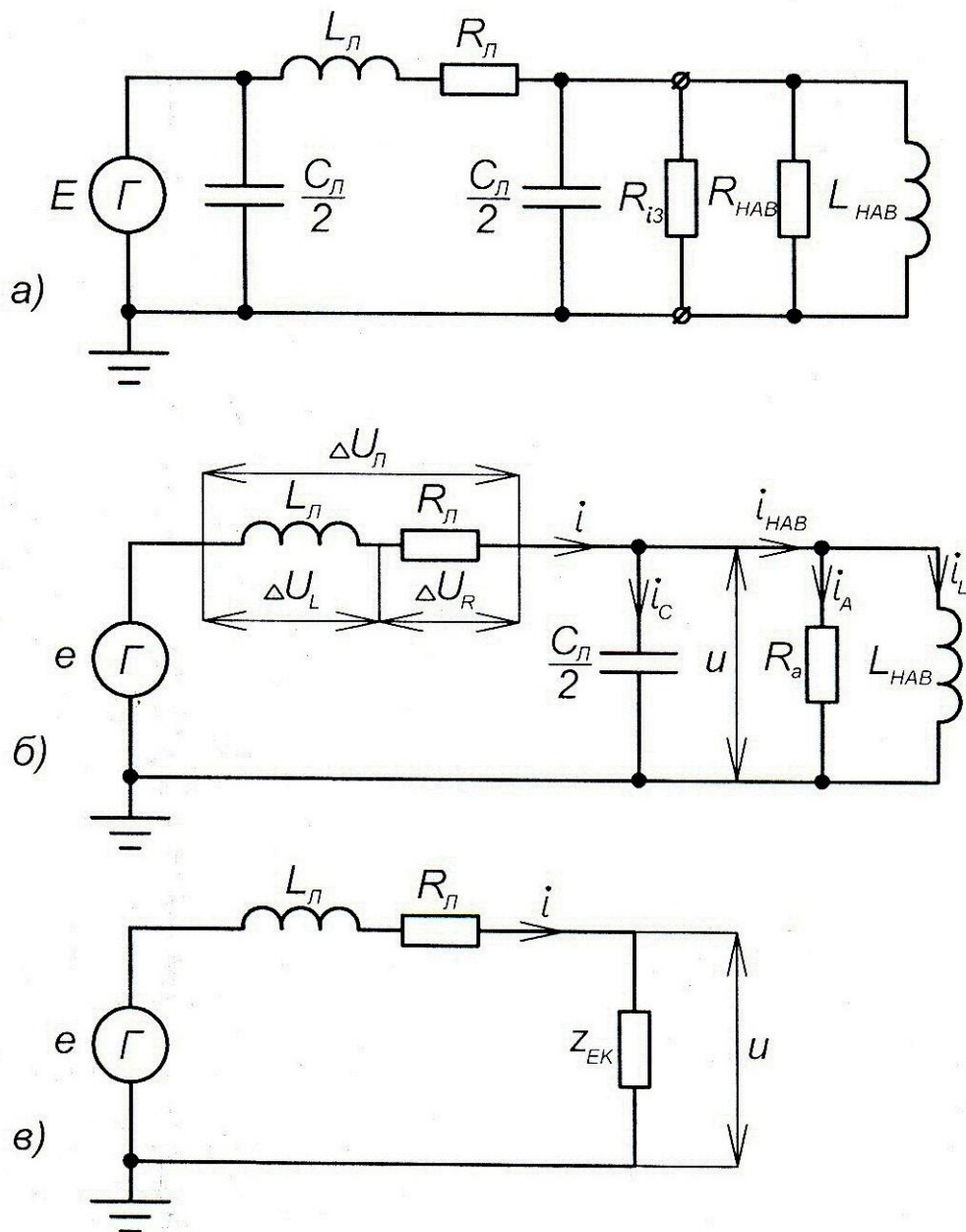


Рисунок 1.2. – Еквівалентні схеми лінії електропередачі в нормальному режимі

Навантаження відображається параметрами $R_{НАВ}$ та $L_{НАВ}$.

Комутаційну апаратуру у схемі не показано.

Таку еквівалентну схему можна спростити (рис. 1.2, в): ємність $\frac{C_L}{2}$ на початку лінії можна не враховувати, оскільки вона приєднана до затискачів потужного генератора, а активні опори $R_{із}$ та $R_{НАВ}$ замінити одним еквівалентним опором

$$R_a = \frac{R_{i3} \cdot R_{HAB}}{R_{i3} + R_{HAB}}, \quad (1.8)$$

який, з урахуванням $R_{i3} \gg R_{HAB}$, визначається, звичайно, $R_a \approx R_{HAB}$.

Позначивши струми та напруги у схемі так, як показано на рис. 1.2, б, обчислимо їх за умови, що напруга U з боку споживача практично рівна номінальній, а кут φ зсуву фаз між напругою та струмом навантаження I_{HAB} складає, зазвичай, близько $35...40^\circ$ (рис. 1.3). Ємнісний струм I_C випереджає напругу на кут 90° , тому струм I лінії відстає від напруги U на кут φ_L , що значно менший за кут φ .

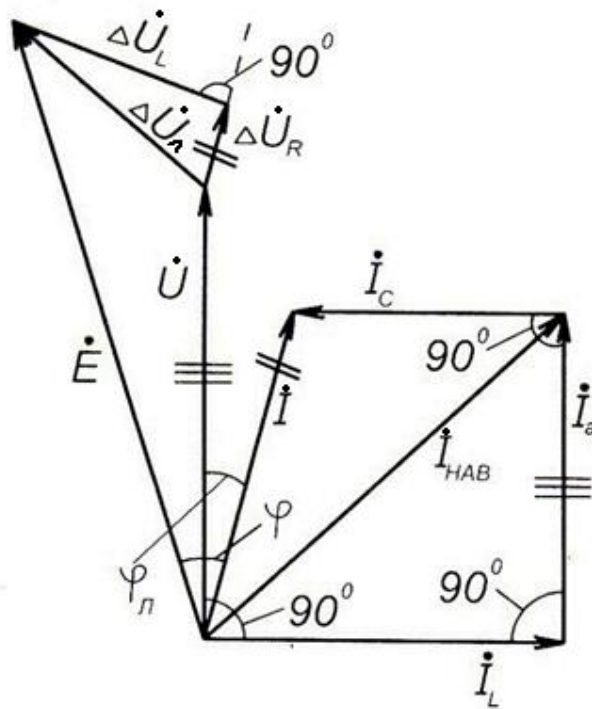


Рисунок 1.3. – Векторна діаграма струмів і напруг ЛЕПу нормального режимі роботи

Необхідно враховувати ту обставину, що падіння напруги $\Delta U_R = I \cdot R_L$ співпадає з напрямком струму I , в той же час падіння напруги $\Delta U_L = j \cdot \omega \cdot L_L \cdot I$ випереджає його на 90° . Також потрібно враховувати і той фактор, що зазвичай лінії електропередачі характеризуються питомим параметрами:

індуктивний опір $X_0 = \omega \cdot L_0 \approx 0,4$ (Ом / км);

активний опір $R_0 \approx 0,01$ (Ом/км). (1.9)

Тому у лінії довжиною l кут $\varphi_{ЛЕП}$ між падінням напруги ΔU_L та струмом I являє собою наступний вираз:

$$\varphi_{ЛЕП} = \arctg \frac{\omega \cdot L_0}{R_0} = \arctg \frac{0,4}{0,01} \approx 90^\circ. \quad (1.10)$$

Це дозволяє завершити побудову векторної діаграми та за законом Кірхгофа знайти \dot{E} :

$$\dot{E} = \dot{U} + \Delta \dot{U}_L. \quad (1.11)$$

Паралельно з'єднані активний, індуктивний та ємнісний опори (рис. 1.2, б) замінимо еквівалентним опором $Z_{ЕК}$. Для цього використаємо відповідні провідності:

$g = \frac{1}{R_a}$ – провідність активної гілки;

$b_L = \frac{1}{\omega \cdot L_{HAB}}$ – провідність індуктивної гілки;

$b_C = \omega \cdot \frac{C_L}{2}$ – провідність ємнісної гілки.

А для визначення реактивної провідності маємо наступний вираз:

$$b = b_L - b_C = \frac{1}{\omega \cdot L_{HAB}} - \omega \cdot \frac{C_L}{2}. \quad (1.12)$$

Тоді всі гілки мають повну провідність

$$y_{ЕК} = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}, \quad (1.13)$$

а їх еквівалентний опір

$$\dot{z}_{ЕК} = \frac{1}{y_{ЕК}} = \frac{1}{g - j \cdot b} = \frac{g}{g^2 + b^2} + j \cdot \frac{b}{g^2 + b^2} = R_{ЕК} + j \cdot X_{ЕК}. \quad (1.14)$$

Таким чином, вхідний опір лінії дорівнює

$$\dot{z} = R_L + j \cdot X_L + R_{ЕК} + j \cdot X_{ЕК} = R + j \cdot X, \quad (1.15)$$

де для всієї лінії з урахуванням навантаження діють наступні вирази:

$$R = R_{\text{Л}} + R_{\text{ЕК}}, \quad X = X_{\text{Л}} + X_{\text{ЕК}}, \quad z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R}. \quad (1.16)$$

Генератор вважатимемо потужним з внутрішнім опором $Z_{\text{Г}} = 0$ та електрорушійною силою:

$$e = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1.17)$$

тому струм у лінії за умови нормального режиму роботи дорівнює:

$$i = \frac{E_m}{z} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi). \quad (1.18)$$

2.2. Струми у лінії після виникнення «металевого» короткого замикання

З огляду на вищесказане розглянемо випадок, коли у лінії, що досліджується, у момент часу $t_{\text{ВМК}}$ виникає коротке замикання з опором $R_{\text{КЗ}} = 0$ (рис. 1.4). Далі задіємо поняття «кут виникнення к.з.» $\theta = \omega \cdot t_{\text{ВМК}}$.

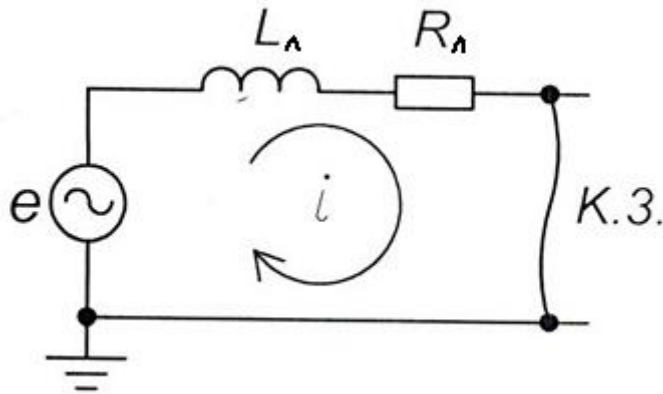


Рисунок 1.4. – Еквівалентна схема лінії електричної мережі з «глухим» металевим коротким замиканням.

2.2.1. Примусовий режим

Після закінчення перехідних процесів у лінії буде проходити лише примусовий струм $i_{\text{ПР}}$, величина якого характеризується індуктивністю $L_{\text{Л}}$ та активним опором $R_{\text{Л}}$. Тому в умовах цього режиму повний опір z кола та кут $\varphi_{\text{ЛЕП}}$ відставання струму від напруги знаходимо за співвідношеннями:

$$X_{\text{Л}} = \omega \cdot L_{\text{Л}}, \quad z = \sqrt{R_{\text{Л}}^2 + X_{\text{Л}}^2}, \quad \varphi_{\text{ЛЕП}} = \arctg \frac{\omega \cdot L_{\text{Л}}}{R_{\text{Л}}}, \quad (1.19)$$

приймаючи е.р.с. генератора згідно виразу (1.17).

Тоді примусовий (тобто усталений) струм визначається за виразом:

$$i_{\text{ПР}} = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_{\text{ЛЕП}}), \quad (1.20)$$

де $I_m = \frac{E_m}{z}$ – амплітуда примусового струму.

2.2.2. Вільний режим

Для знаходження вільного струму складаємо схему, в якій генератор заміщується перемичкою, оскільки раніше прийнято, що його внутрішній опір дорівнює нулю (рис. 1.5).

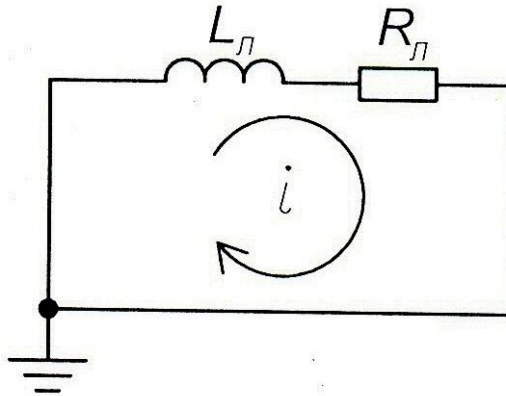


Рисунок 1.5. – Електрична схема для обчислення вільного струму

Тоді для будь-якого моменту часу маємо:

$$i_B \cdot R_{\text{Л}} + L_{\text{Л}} \cdot \frac{di_B}{dt} = 0, \quad (1.21)$$

звідки після перетворення рівняння (1.21) знаходимо

$$\frac{di_B}{i_B} = -\frac{1}{\frac{L_{\text{Л}}}{R_{\text{Л}}}} \cdot dt. \quad (1.22)$$

Розв'язок рівняння (1.22) має вигляд:

$$\ln(i_B) = -\frac{t}{\tau} + \ln(D), \text{ або } \ln\left(\frac{i_B}{D}\right) = -\frac{t}{\tau}; \quad (1.23)$$

тоді

$$i_B = D \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1.24)$$

де $\tau = \frac{L_J}{R_J}$ – стала перехідного процесу, D – стала, яка визначається умовами,

за яких на лінії виникає коротке замикання.

Найбільші струми короткого замикання у лінії виникають у тому випадку, коли вона ненавантажена (тобто струм нормального режиму у ній дорівнює нулю) і раптово на лінії виникає коротке замикання.

Прийнявши цей момент часу за початковий $t = 0$, з рівняння (1.6) маємо наступний вираз:

$$0 = i_{IP} \big|_{t=0} + i_B \big|_{t=0}, \quad (1.25)$$

На основі рівнянь (1.20) та (1.24) отримуємо наступне співвідношення за умови, що $t = 0$:

$$0 = \frac{E_m}{z} \cdot \sin(\theta - \varphi_{ЛЕП}) + D, \quad (1.26)$$

де θ – фазовий кут виникнення струму короткого замикання.

Використовуючи вираз (1.26), отримуємо:

$$D = -\frac{E_m}{z} \cdot \sin(\theta - \varphi_{ЛЕП}). \quad (1.27)$$

Тоді загальний розв'язок для будь-якого моменту часу $t \geq t_{ВМК}$:

$$i(t) = I_m \cdot \left(\sin(\omega \cdot (t - t_{ВМК}) + \theta - \varphi_{ЛЕП}) - \sin(\theta - \varphi_{ЛЕП}) \cdot e^{-\frac{t - t_{ВМК}}{\tau}} \right), \quad (1.28)$$

де $I_m = \frac{E_m}{z}$ – амплітуда струму.

3. Повні струми у колі з коротким замиканням

Залежність (1.28) зображена графічно (рис. 1.6, а), з урахуванням того, що згідно (1.10) має місце наступний вираз:

$$\varphi_{ЛЕП} = \arctg \frac{\omega \cdot L_J}{R_J} = \arctg \frac{0,4}{0,01}, \text{ та що } t_{ВМК} = \frac{\theta}{\omega}.$$

Якщо $t_{ВМК}$ співпадає з моментом, коли $i_{ПР} = 0$, тобто при $\theta = \frac{\pi}{2}$, то вільний струм відсутній і одразу настає сталий режим (рис. 1.6 б).

Найбільш несприятливим моментом виникнення к.з. є такий, коли $\theta = 2 \cdot \varphi_{ЛЕП} = \pi$ (рис. 1.6 в), оскільки в цьому випадку при $t_{ВМК} = 0,01$ с примусовий струм дорівнює амплітуді $i_{ПР}(0) = I_{ПРm}$, а вільний струм $i_B(0) = -I_{ПРm}$. Внаслідок повільного загасання вільного струму практично через половину періоду $\frac{T}{2}$ примусового струму повний струм досягає найбільшого можливого за амплітудою значення, яке називають ударним струмом $I_{уд}$ (рис. 1.6 в).

Іноді примусовий струм називають періодичним, а вільний – аперіодичним.

Перевагою розглянутого способу обчислення повного струму короткого замикання та його складових (примусового і вільного струмів) є відсутність у алгоритмі ітераційних процесів, що при використанні сучасних обчислювальних систем дозволяє враховувати необхідну кількість факторів без втрати впливу кожного фактору окремо.

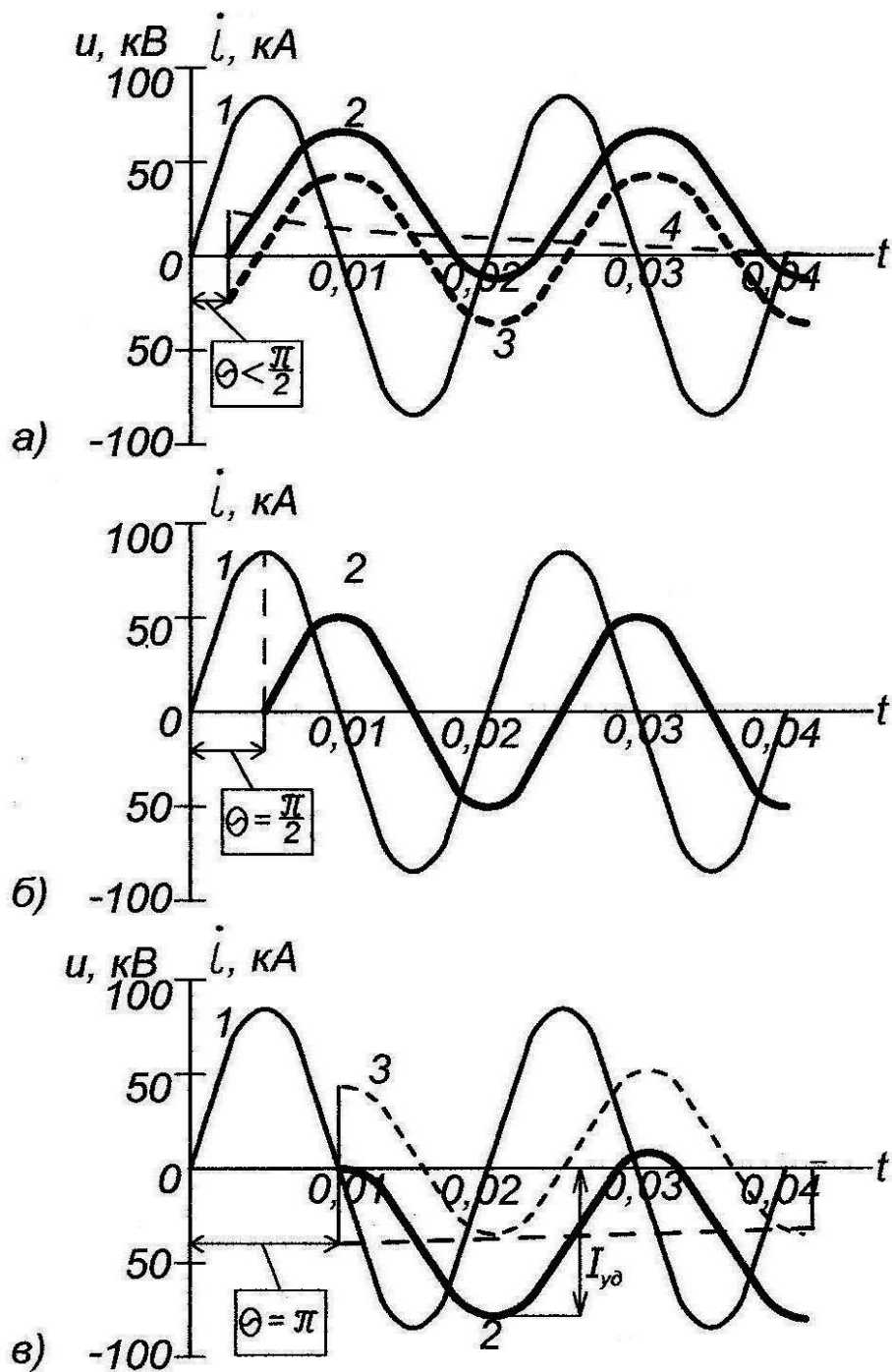


Рисунок 1.6. – Залежність повного струму (крива 2) та його складових від моменту вмикання к.з.: примусовий (крива 3) та вільний (крива 4) струми у

лінії довжиною 300 км з номінальною фазною напругою $U_{\text{фн}} = \frac{110}{\sqrt{3}}$ кВ

(крива 1) і з середніми питомими параметрами; ударний струм $I_{\text{уд}} = 1,45$ кА.

4. Програма обчислень струмів та напруг у випадку виникнення КЗ на ЛЕП

Програма розроблена у середовищі MathCAD 15, але може використовуватись з іншими версіями MathCAD, а також бути виконана в інших програмних середовищах.

Програма складається з таких блоків:

- блок вводу початкових даних;
- блок обчислень;
- блок виводу графіків функцій $u=f(t)$ та $i=f(t)$.

Блок вводу даних має зручний інтерфейс. Для більшої наочності і простоти увід даних оформлено різними кольорами.

Блок обчислень доволі великий і громіздкий, тому для нього задіяна функція, за допомогою якої він може бути легко знятий з екрану монітору і не займати зайвого простору.

Блок виводу графіків наочно виводить отримані криві, які також оформлені різними кольорами.

5. Методика проведення роботи

Після введення програми в роботу на екрані монітору з'являються початкові дані контрольного прикладу, за якими може бути проведене обчислення кривих струмів та напруг:

- Номінальна напруга ЛЕП U_n [кВ].
- Довжина ЛЕП l [км].
- Частота мережі f [Гц].
- Питома індуктивність ЛЕП L_0 [мГн/км].
- Питомий активний опір проводів ЛЕП R_0 [Ом/км].
- Момент виникнення к.з. $t_{ВМК}$ [с].

Після перевірки роботи програми у блок вводу даних потрібно ввести нові початкові дані у відповідності з поставленим завданням і запустити

програму в роботу. На основі аналізу отриманих кривих струмів і напруг визначають необхідні залежності.

Необхідно мати на увазі, що обчислення за програмою можуть бути проведені за умови будь-яких вихідних даних, але якщо ці дані далекі від реальних, то результати в цьому випадку практично не будуть мати навчального значення.

Для вибору вихідних параметрів досліджуваної ЛЕП доцільно скористатись даними, наведеними у табл. 1.1 і 1.2. У випадках проведення досліджень для ЛЕП інших номінальних напруг, наприклад, 150 кВ, 1150 кВ тощо необхідні значення вихідних даних повинні мати відповідне обґрунтування.

Таблиця 1.1

Усереднені параметри прямої та зворотної послідовності ЛЕП

Параметри	U _{ном} , кВ			
	до 220	330	500	750
L _{пит} , мГ/км	1,25	1,0	0,9	0,8
C _{пит} , пФ/км	8500	11500	13000	14000
Хвильовий опір, Ом	400	300	280	250

Таблиця 1.2

Питомий активний опір алюмінієвих та сталюалюмінієвих проводів

Номінальний Переріз, мм ²	Алюмінієві Проводи (А), Ом/км	Сталеалюмінієві проводи (АС), Ом/км	Сталеалюмінієві Проводи (АСО), Ом/км
16	1,98	-	-
25	1,28	1,38	-
35	0,92	0,85	-
50	0,64	0,65	-
70	0,46	0,46	-
95	0,338	0,33	-
120	0,27	0,27	-
150	0,21	0,21	0,21
185	0,17	0,17	0,17
240	0,132	0,132	0,13

300	0,108	0,107	0,108
400	-	0,08	0,08
500	-	-	0,065
600	-	-	0,05
700	-	-	0,044

6. Завдання

1. Ознайомитися з основними теоретичними положеннями обчислення струмів короткого замикання за класичним методом.

2. Дослідити величину повного, примусового, вільного та ударного струмів КЗ у повітряній ЛЕП класу 220 кВ з параметрами, у відповідності до варіанту завдання.

3. У звіті до роботи навести осцилограми з екрану ПК, на яких відмітити основні параметри: амплітуду в кВ, значення струмів в кА, фазовий зсув між е.р.с. генератора і струмом тощо.

4. Дослідити залежність ударного струму від моменту $t_{ВМК}$ виникнення КЗ. Побудувати графік цієї залежності для ЛЕП класу 220 кВ з параметрами, у відповідності до варіанту завдання. Зробити висновки.

5. Викладачем може бути задано проведення інших досліджень для ЛЕП з різними номінальними напругами, довжинами та питомими параметрами.

6. Всі отримані результати повинні бути проілюстровані необхідною кількістю оброблених осцилограм.

7. Після закінчення досліджень за планом лабораторної роботи необхідно скласти звіт з результатами аналізу та отриманими висновками.

7. Контрольні питання

1. Опишіть поняття: примусові та вільні напруги і струми.

2. На основі яких положень визначаються примусовий та вільний струми і напруги за класичним методом у режимі короткого замикання схеми?

3. Чому у разі обчислення вільного струму генератор зображають закорткою?
4. Що називають ударним струмом?
5. Як впливає активний опір та індуктивність проводів ЛЕП на величину струмів К.З.?
6. Як і чому впливає момент виникнення К.З. на струм у схемі?
7. На основі отриманих в лабораторній роботі даних визначте амплітуду струмів К.З.: повного, примусового, вільного та ударного.
8. Сформулюйте вимоги до високовольтного вимикача на основі проведених досліджень.
9. Що називають періодичним і аперіодичним струмом?

Варіанти вхідних даних для розрахунків

№ варіанту	Питомий активний опір лінії, Ом/км	Питома індуктивність лінії, мГн/км	Питома ємність лінії, пФ/км	Комплексний опір навантаження, Ом	cos φ навантаження	Довжина лінії, км
1	0,098	1,366	8403	400	0,8	240
2	0,061	1,315	8722	450	0,88	320
3	0,075	1,337	8594	390	0,75	150
4	0,121	1,385	8276	410	0,68	220
5	0,096	1,366	8420	650	0,72	350
6	0,024	1,366	8710	420	0,91	410
7	0,073	1,337	8620	500	0,8	120
8	0,118	1,385	8408	550	0,79	375
9	0,061	1,315	8722	620	0,65	550
10	0,075	1,337	8594	490	0,87	320
11	0,121	1,385	8276	440	0,89	470
12	0,098	1,366	8403	370	0,9	355
13	0,024	1,366	8710	510	0,73	170
14	0,073	1,337	8620	390	0,6	580
15	0,118	1,385	8408	350	0,85	125
16	0,098	1,366	8403	520	0,65	610
17	0,061	1,315	8722	500	0,72	280
18	0,075	1,337	8594	405	0,63	475
19	0,121	1,385	8276	560	0,83	125
20	0,096	1,366	8420	480	0,92	560

Дослідження на комп'ютерній моделі електродинамічних сил взаємодії між паралельними провідниками у разі змінного струму короткого замикання

з дисципліни «Електричні апарати» (4 академічні години)

Мета роботи: дослідити електродинамічні зусилля між паралельними провідниками і їх рух під дією струму короткого замикання в залежності від його параметрів, а також від довжини шин і відстані між ними.

Теоретичні положення

2.1. Шинні конструкції розподільних пристроїв внутрішнього типу

Розподільні пристрої (РП) підстанцій складаються з окремих комірок (рис. 2.1, комірки 1-8) для розміщення вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів напруги, розрядників тощо.

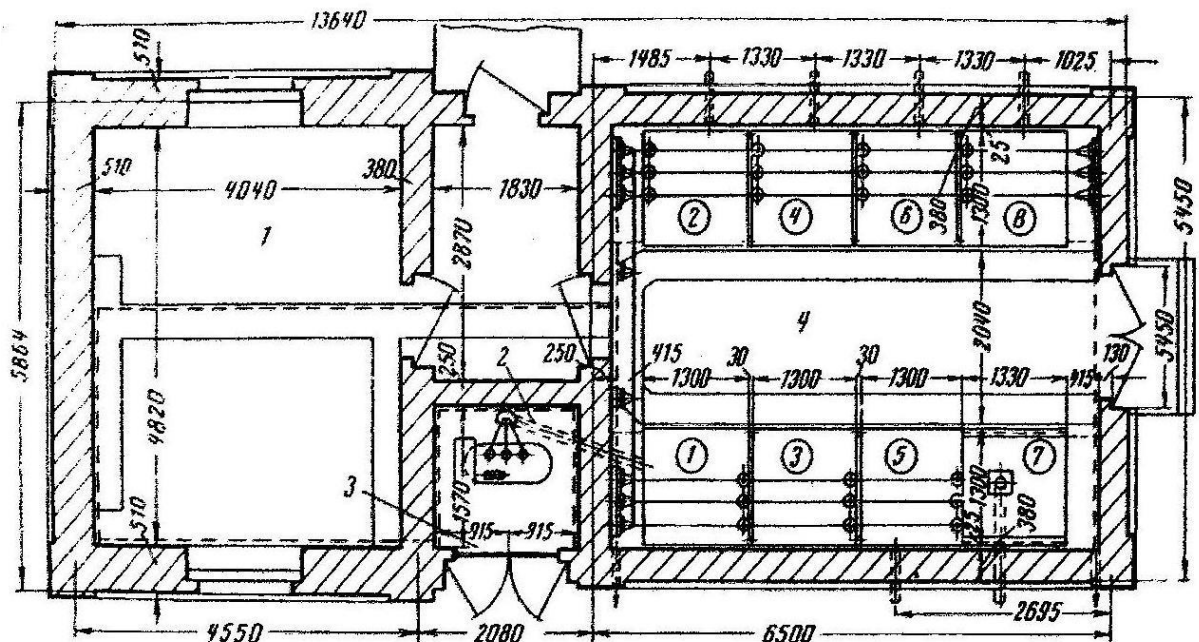


Рисунок 2.1. – План і схема заповнення РП-10 з однією системою збірних шин з одним трансформатором і дворядним розміщенням комірок:

1. приміщення для допоміжного обладнання;

2. вихід кабельної лінії;
3. приміщення для трансформатора власних потреб;
4. комірки РП (8 комірок)

Між собою комірки з'єднуються шинами, які розміщуються в одній площині – горизонтальній, похилій або вертикальній (рис. 2.2).

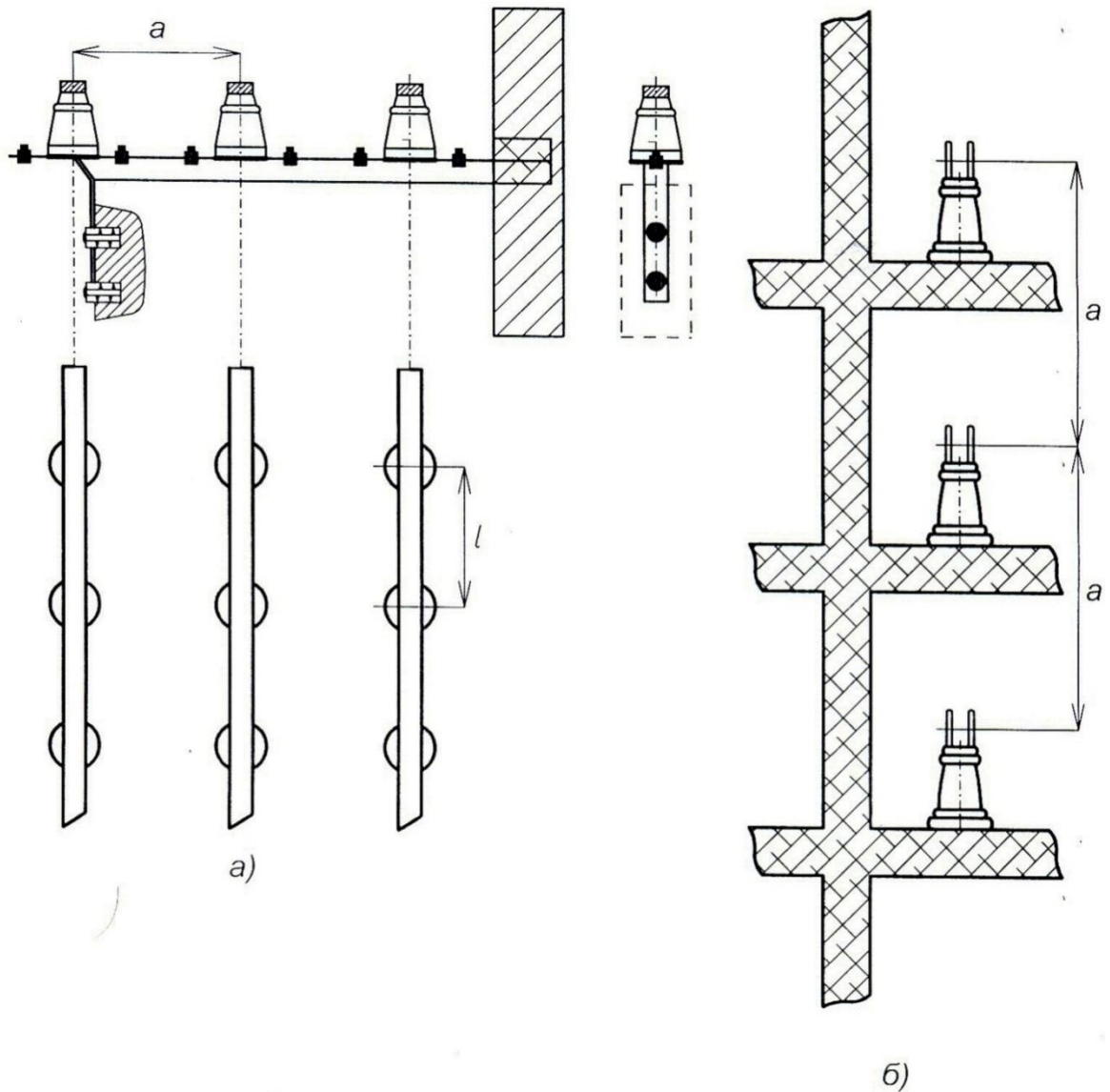


Рисунок 2.2. – Розміщення шинних конструкцій:

а – горизонтальне, б – вертикальне

2.2. Властивості струмів короткого замикання між шинами

Розглянемо випадок, коли вимикачем В до генератора підключається лінія, на якій існує «глухе» металеве коротке замикання (рис. 2.3).

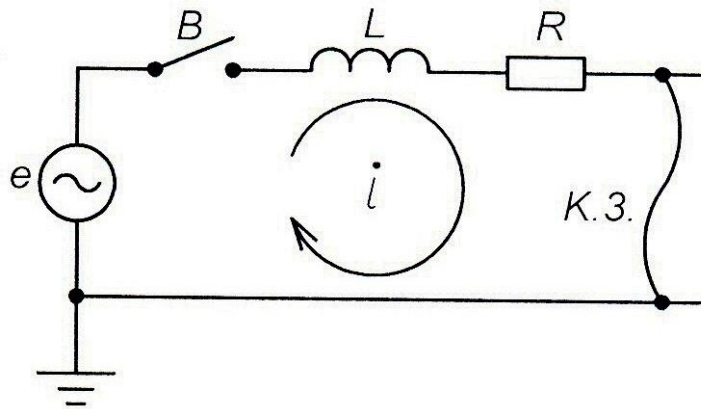


Рисунок 2.3. – Еквівалентна схема електричного кола з глухим «металевим» коротким замиканням

Звичайно лінії характеризуються питомими параметрами :

індуктивний опір $X' = \omega L' = 0.4 \text{ Ом/км}$;

активний опір $R' \approx 0.01 \text{ Ом/км}$.

Генератор будемо вважати потужним з внутрішнім опором $Z_G = 0 \text{ Ом}$ і електрорушійною силою:

$$e = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (2.1)$$

Виникаючий у колі струм i складається з примусового $i_{\text{пр}}$ та вільного $i_{\text{в}}$ струмів:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{в}}. \quad (2.2)$$

Для примусового струму за законом Кірхгофа маємо

$$i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta), \quad (2.3)$$

де θ – фазовий кут для моменту часу $t = 0$ (моменту $t_{\text{ВМК}}$) вмикання напруги генератора.

Лінія довжиною l характеризується параметрами:

$$X = \omega \cdot L' \cdot l, \quad R = R' \cdot l, \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{\omega \cdot L'}{R'}, \quad (2.4)$$

тому:

$$i_{np} = \frac{E_m}{Z} \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta - \varphi). \quad (2.5)$$

Для знаходження вільного струму складемо схему, в якій генератор заміщується перемичкою, оскільки раніше прийнято, що його внутрішній опір дорівнює нулю (рис. 2.4).

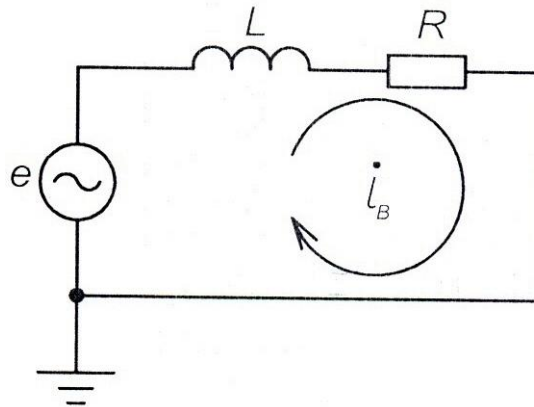


Рисунок 2.4. – Електрична схема для обчислення вільного струму

Тоді:

$$i_e \cdot R + L \cdot \frac{di_e}{dt} = 0, \quad (2.6)$$

звідки після перетворення рівняння (2.6) маємо:

$$\frac{di_B}{i_B} = -\frac{1}{\frac{L}{R}} \cdot dt, \quad (2.7)$$

рішення якого має вигляд:

$$i_B = D \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2.8)$$

де $\tau = \frac{L}{R}$ – стала перехідного процесу, D – стала, яка визначається

початковими умовами. При $t = 0$ маємо:

$$W_M = \frac{L \cdot i^2}{2} = 0, i = 0. \quad (2.9)$$

З рівнянь (2.2) , (2.5) і (2.8) знаходимо:

$$0 = i_{np} \Big|_{t=0} + i_e \Big|_{t=0}, \quad (2.10)$$

$$0 = \frac{E_m}{Z} \cdot \sin(\theta - \varphi) + D. \quad (2.11)$$

Використовуючи (2.11), отримуємо:

$$D = -\frac{E_m}{Z} \cdot \sin(\theta - \varphi), \quad (2.12)$$

тоді загальний розв'язок для будь-якого моменту t :

$$i(t) = I_m \cdot \left(\sin(\omega \cdot t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2.13)$$

де $I_m = \frac{E_m}{Z}$ – амплітуда струму.

Залежність (2.13) зображена графічно (рис. 2.5, а), з урахуванням того, що коло короткого замикання має опір $R' \approx 0,01$ Ом/км, то згідно (2.4) маємо наступний вираз:

$$\varphi = \arctg \frac{\omega \cdot L'}{R'} = \arctg \frac{0,4}{0,01} \approx 90^\circ, \text{ а } t_{БМК} = \frac{\theta}{\omega}.$$

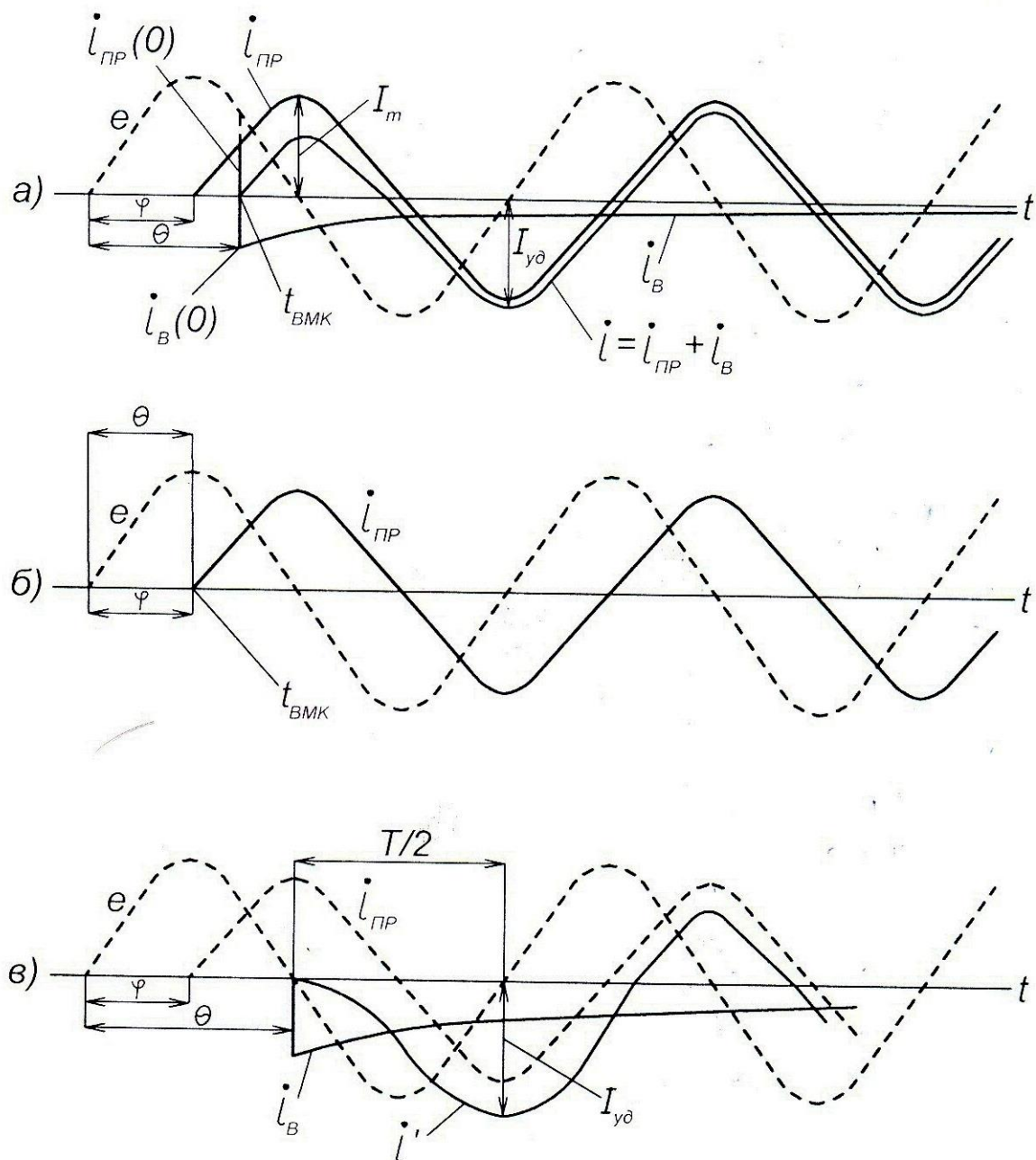


Рисунок 2.5. – Осцилограми струмів короткого замикання при різних моментах їх виникнення

Якщо $t_{ВМК}$ співпадає з моментом, коли $i_{\text{нр}} = 0$, тобто при $\theta = \frac{\pi}{2}$, то вільний струм відсутній і одразу настає сталий режим (рис. 2.5, б).

Найбільш несприятливим моментом виникнення к.з. є такий, коли $\theta = 2 \cdot \varphi = \pi$ (рис. 2.5, в), оскільки в цьому випадку при $t_{ВМК} = 0$ примусовий струм $i_{\text{нр}}(0) = I_{\text{нрм}}$ дорівнює амплітуді, а вільний струм $i_{\text{в}}(0) = -I_{\text{нрм}}$. При повільному

загасанні вільного струму практично через половину періоду $\frac{T}{2}$ примусового струму повний струм досягає найбільшого можливого за амплітудою значення, яке називають ударним струмом $I_{y\partial}$ (рис. 2.5, в).

Аналогічні значення примусового і вільного струмів мають у разі $t = 0$ і $\theta = 0$, оскільки з рівняння (2.13) випливає, що у цьому випадку $i_{np}(0) = -I_{npr}$, $i_{\partial}(0) = I_{npr}$ і через половину періоду $\frac{T}{2}$ повний струм досягає ударного струму $I_{y\partial}$ (рис. 2.6):

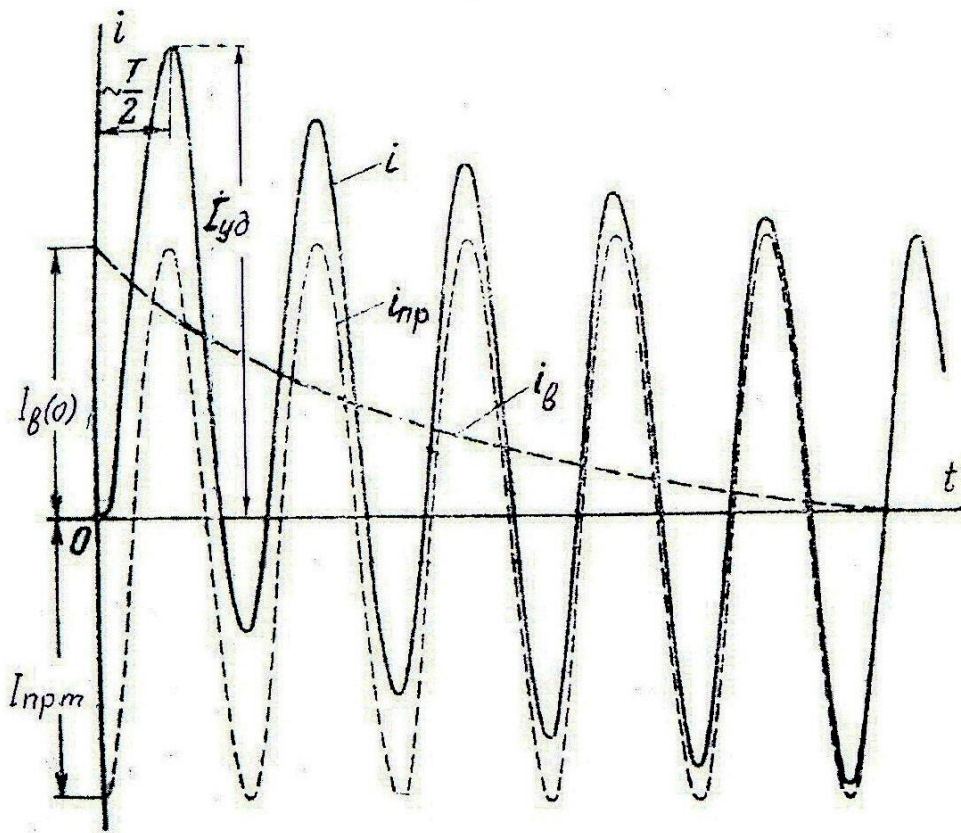


Рисунок 2.6. – Осцилограма струму короткого замикання при максимальному значенні вільної складової

θ – початкова фаза напруги при вмиканні генератора;

$\varphi = \frac{\pi}{2}$ – кут між напругою і струмом у колі.

$$I_{y\partial} = \frac{E_m}{Z} \cdot \left(1 + e^{\frac{-T}{2\tau}} \right), \quad (2.14)$$

де $\frac{E_m}{Z} = I_m$ – амплітуда примусового струму, а $e^{\frac{-T}{2\tau}}$ – згасання вільного струму за час $\frac{T}{2}$.

Відношення

$$k_{y\partial} = \frac{I_{y\partial}}{I_m} \quad (2.15)$$

називають ударним коефіцієнтом кола к.з. Для ліній високої напруги вибирають проводи з меншим питомим опором R' , ніж для ліній низької напруги. Тому найчастіше на практиці для таких ліній:

$$k_{y\partial BH} = 1,8; k_{y\partial HH} = 1,8. \quad (2.16)$$

Звідси видно, що за першу половину періоду вільний струм зменшується:

у колі ВН на $(I_{\text{вм}} - 0,8 \cdot I_{\text{вм}}) \cdot 100\% = 20\%$;

у колі НН на $(I_{\text{вм}} - 0,4 \cdot I_{\text{вм}}) \cdot 100\% = 60\%$.

Таким чином, практично вільну складову струму необхідно враховувати тільки при визначенні ударного струму, а далі вона швидко зменшується, і залишається тільки періодичний струм к. з.

2.3. Електродинамічні зусилля при змінному струмі

Усталений змінний струм короткого замикання у замкненому колі (рис. 2.7) описується рівнянням:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (2.17)$$

де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кутова частота струму.

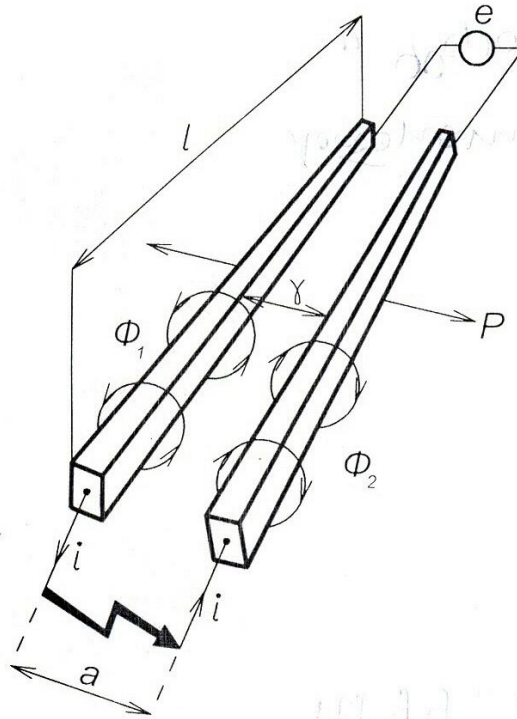


Рисунок 2.7. – Ескіз короткозамкненого кола для обчислення електродинамічних зусиль, що діють на шини довжиною l на відстані a між їх вісями

Для обчислення електродинамічних зусиль між шинами використаємо метод енергетичного балансу системи провідників зі струмом: якщо при незмінному струмі i під дією сили P , що створюється цим струмом, провідник (шина) переміщується на віддаль dx , то, по-перше, зростає індуктивність L кола на величину dL , а, по-друге, при цьому силою P виконується робота $P \cdot dx$, яка згідно закону збереження енергії приводить до збільшення енергії W всієї системи на величину dW , тобто маємо:

$$P \cdot dx \Big|_{i=\text{const}} = dW ,$$

звідки:

$$P = \frac{dW}{dx} \Big|_{i=\text{const}} . \quad (2.18)$$

Знаючи індуктивність L всього кола, отримуємо для будь-якого моменту часу t :

$$P = \frac{dW}{dx} \Big|_{i=\text{const}} = \frac{d}{dx} \cdot \left(\frac{L \cdot i^2}{2} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{dL}{dx} \right) \cdot i^2 = \frac{A}{2} \cdot i^2 = k \cdot i^2, \quad (2.19)$$

де A – величина, що визначається властивостями кола; $k = \frac{A}{2}$ – коефіцієнт пропорційності.

Використовуючи (2.17), маємо:

$$P = k \cdot I_m^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) = P_m \cdot \sin^2(\omega \cdot t), \quad (2.20)$$

або:

$$P = \frac{P_m}{2} \cdot (1 + \cos(2 \cdot \omega \cdot t)), \quad (2.21)$$

звідки видно, що електродинамічні зусилля змінюються з частотою, у два рази більшою, ніж частота струму, а крім того, при змінному струмі напрямок дії електродинамічних зусиль не змінюється (рис. 2.8).

Завдяки цьому середнє значення електродинамічного зусилля P_{cp} за період дорівнює:

$$P_{cp} = \frac{1}{T_p} \cdot \int_0^{T_p} P \cdot dt = \frac{P_m}{2}. \quad (2.22)$$

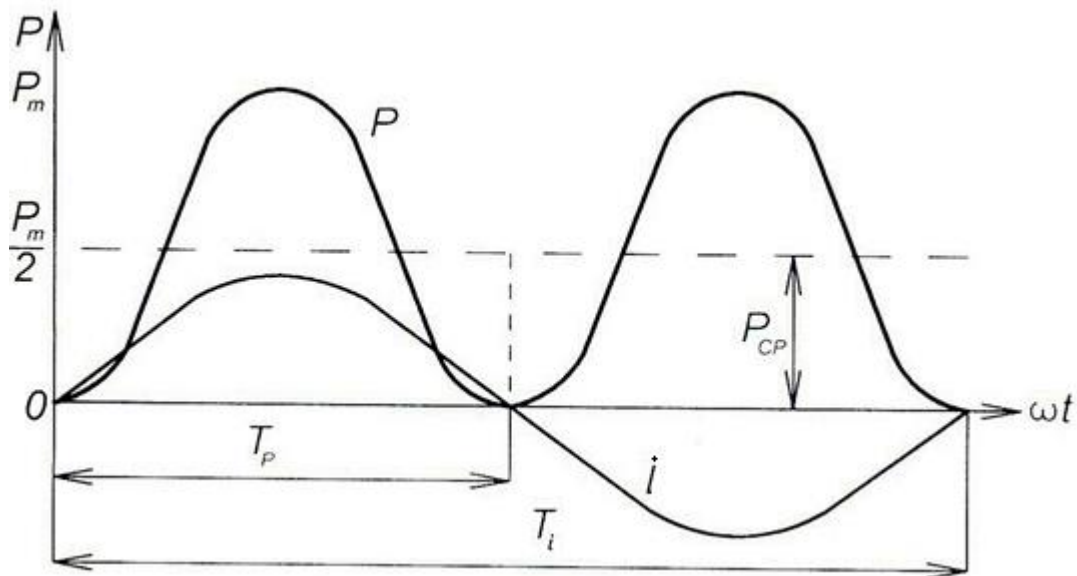


Рис.5.8. Осцилограми усталеного струму та електродинамічного зусилля
 T_i – період синусоїдного струму; T_p – період електродинамічного зусилля.

Змінний струм з вільною складовою створює більш складні електродинамічні зусилля. Оскільки $\varphi = \frac{\pi}{2}$, то при вмиканні генератора з фазою $\theta - \varphi = \pi$ згідно (2.13) маємо:

$$i = -I_m \cdot \sin(\omega \cdot t) + I_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.23)$$

Тоді за формулою (2.19) знаходимо

$$P = k \cdot \left(-I_m \cdot \sin(\omega \cdot t) + I_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right)^2. \quad (2.24)$$

Через певний час t електродинамічні зусилля досягнуть (рис. 2.9) максимального значення:

$$P_m = k \cdot \left(I_m \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau}} + 1 \right) \right)^2 = k \cdot I_{y0}^2. \quad (2.25)$$

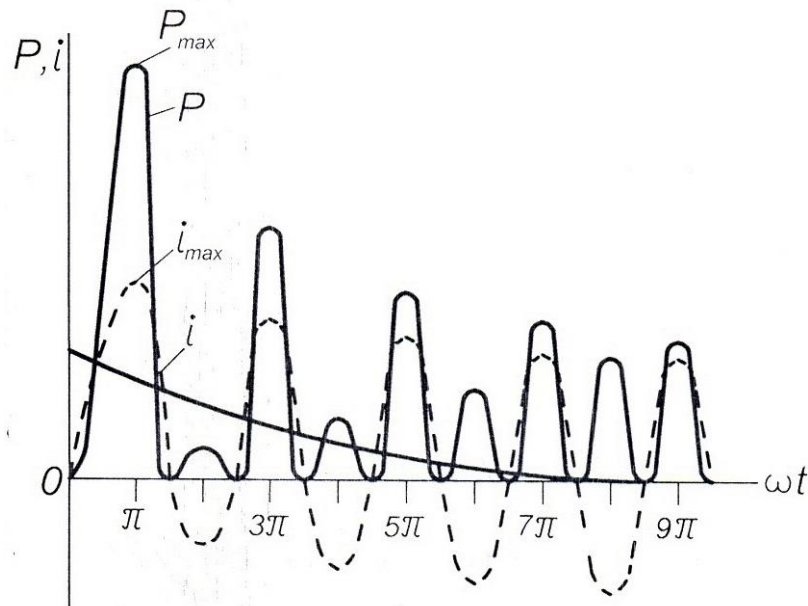


Рисунок 2.9 – Осцилограми струму з вільною складовою та електродинамічного зусилля

Враховуючи (2.15), маємо:

$$P_m = k \cdot k_{y0}^2 \cdot I_m^2. \quad (2.26)$$

Видно, що електродинамічні зусилля $P = f(t)$ змінюються своєрідно: одна половина імпульсу сили поступово зменшується, а друга – збільшується. Коли вільний струм i_e загасає, обидві половини стають однаковими.

Оскільки згідно (2.16) для кола високої напруги $k_{y0}^2 = 1,8^2 \approx 3,24$, можна вважати, що вільна складова струму к.з. збільшує зусилля ударного струму у 3 рази; при цьому періодичний струм к.з. залишається незмінним.

2.4. Рух шин під впливом електродинамічних зусиль від струмів короткого замикання

Шину, що жорстко закріплена, згідно рис. 2.7, можна порівняти з балкою, жорстко закріпленою на кінцях. Її масу m , що рівномірно розподілена вздовж шини довжиною l , будемо вважати зосередженою в її середині. Електродинамічні зусилля також замінимо електродинамічною силою P , що діє на масу m .

У загальному випадку поява сили P призведе до вигинання шини у напрямку дії сили P і збільшення відстані між шинами від початкової $Y = a$ на величину $2y$, де y – вигин однієї шини.

При цьому сила P має наступні складові :

– сила, яка за законом Ньютона зумовлює рух маси m з прискоренням

$$a = \frac{d^2 y}{dt^2} :$$

$$P_1 = m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} ; \quad (2.27)$$

– сила, яка долає внутрішній опір у матеріалі шини (k_T – коефіцієнт тертя) і

забезпечує рух шини зі швидкістю $V = \frac{dy}{dt} :$

$$P_2 = k_T \cdot \frac{dy}{dt} ; \quad (2.28)$$

– сила, яка долає пружність W шини:

$$P_3 = W \cdot y. \quad (2.29)$$

В результаті рух шини під дією електродинамічної сили $P(t)$ описується рівнянням:

$$m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + k_T \cdot \frac{\partial y}{\partial t} + W \cdot y = P(t). \quad (2.30)$$

2.4.1. Рух шини великої довжини

Електродинамічна сила $P(t)$ у разі струму промислової частоти змінюється з частотою 100 Гц (рис. 2.8). Якщо маса m шини значна (розмір l великий), то має місце усереднення сили $P(t)$ до величини $P_{CP} = const$.

Для знаходження залежності $y = f(t)$ перетворимо (2.30):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{k_T}{m} \cdot \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{W}{m} \cdot y = \frac{P_{CP}}{m} \quad (2.31)$$

і складемо характеристичне рівняння:

$$\alpha^2 + \frac{k_T}{m} \cdot \alpha + \frac{W}{m} = 0 \quad (2.32)$$

звідки маємо:

$$\alpha_{1,2} = -\frac{k_T}{2 \cdot m} \pm \sqrt{\left(\frac{k_T}{2 \cdot m}\right)^2 - \frac{W}{m}}. \quad (2.33)$$

Оскільки маса m велика, то $\left(\frac{k_T}{m}\right)^2 \ll \frac{W}{m}$, тому рівняння (2.33) показує,

що рух шини є коливним і можна прийняти показник загасання коливного процесу:

$$\delta = \frac{k_T}{2 \cdot m}, \quad (2.34)$$

кутова частота власних коливань шинного прольоту

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{m}}. \quad (2.35)$$

Тоді рівняння (2.31) приймає вигляд:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 \cdot y = \frac{P_{CP}}{m}, \quad (2.36)$$

і, з урахуванням (2.34) і (2.35), для (2.33) маємо:

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm j \cdot \omega_0. \quad (2.37)$$

У цьому випадку залежність $y=f(t)$ має вигляд:

$$y = A_1 \cdot e^{\alpha_1 t} + A_2 \cdot e^{\alpha_2 t} + B. \quad (2.38)$$

Звідси:

$$y = A_1 \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + A_2 \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + B, \quad (2.39)$$

де A_1, A_2, B сталі інтегрування.

Приймаємо:

$$\begin{aligned} A_1 &= D_0 \cdot \sin \psi, \\ A_2 &= D_0 \cdot \cos \psi, \end{aligned} \quad (2.40)$$

де D_0, ψ – нові сталі.

Тоді

$$y = D_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot (\sin \psi \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \cos \psi \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)) + B,$$

або

$$y = D_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \psi) + B. \quad (2.41)$$

Далі з (2.41) знаходимо:

$$\frac{dy}{dt} = D_0 \cdot (-\delta) \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \psi) + D_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \omega_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \psi), \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} &= D_0 \cdot (-\delta)^2 \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \psi) + D_0 \cdot (-\delta) \cdot e^{-\delta t} \cdot \omega_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \psi) + \\ &+ D_0 \cdot (-\delta) \cdot e^{-\delta t} \cdot \omega_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \psi) - D_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \omega_0^2 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \psi). \end{aligned} \quad (2.43)$$

Сталі інтегрування знаходимо з граничних умов:

при $t = 0$

$$y|_{t=0} = 0; \quad (2.44)$$

$$\frac{dy}{dt}|_{t=0} = V(0) = 0. \quad (2.45)$$

Оскільки шина масою m не має запасу кінетичної енергії, то при $t \rightarrow \infty$ (сталий режим) з рівнянь (2.42) і (2.43) маємо:

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t \rightarrow \infty} = 0; \quad \left. \frac{d^2 y}{dt^2} \right|_{t \rightarrow \infty} = 0, \quad (2.46)$$

тому з рівнянь (2.30) і (2.31) отримаємо:

$$y|_{t \rightarrow \infty} = y_{стал} = \frac{P_{CP}}{W} = B. \quad (2.47)$$

З (2.42) і (2.43) випливає:

$$\psi = \arctg \frac{\omega_0}{\delta}, \quad (2.48)$$

а з (2.41), (2.44) і (2.48) знаходимо:

$$D_0 = -\frac{B}{\sin \psi}. \quad (2.49)$$

Таким чином, загальне рівняння, що описує рух шинного прольоту, на основі (2.41) і (2.47) має вигляд (рис. 2.10) коливального процесу:

$$y = \frac{P_{CP}}{W} \cdot \left(1 - \frac{e^{-\delta \cdot t}}{\sin \psi} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \psi) \right), \quad (2.50)$$

причому максимальний вигин y_m має місце через половину періоду $\frac{T_0}{2}$

власних коливань шини, а величина $\delta \approx 0$.

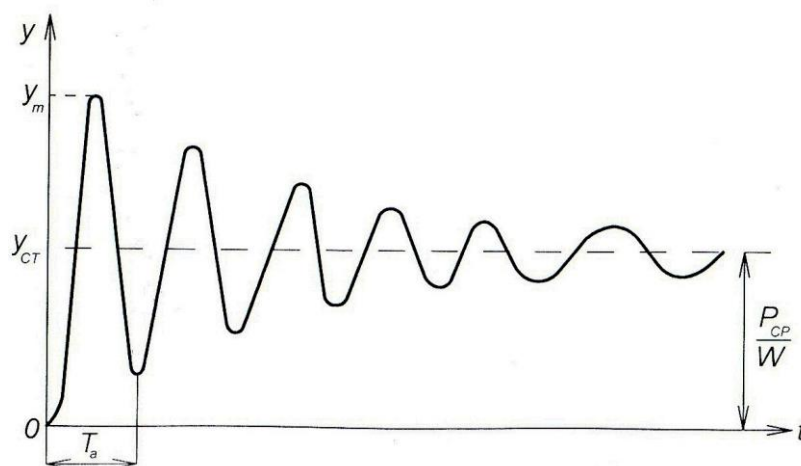


Рисунок 2.10. – Залежність вигину y шини від часу t у випадку прикладення до неї усталеної сили P_{CP} (W – пружність шини).

2.4.2. Рух шини у резонансному режимі

За умови, що маса m шини невелика (невелика довжина l), то частота ω_0 власних коливань згідно (2.35) зростає, і може співпасти з частотою коливань електродинамічної сили $P(t)$.

Найважчий випадок має місце, коли $\delta \approx 0$, а частота струму ω і частота ω_0 власних коливань шини співпадають, тобто коли $\omega = \omega_0$. В цьому випадку розв'язок рівняння (2.30) приводить до співвідношення:

$$y = k \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) - k \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t), \quad (2.51)$$

де k – коефіцієнт пропорційності з рівняння (2.19).

Представивши (2.51) як

$$y = k \cdot (1 - e^{-\delta \cdot t}) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t), \quad (2.52)$$

і враховуючи, що $y(0) = 0$, бачимо, що в цьому випадку поступово розвивається резонансне збільшення вигину y до величини, яка обмежується втратами енергії на тертя (рис. 2.11), тобто величиною δ .

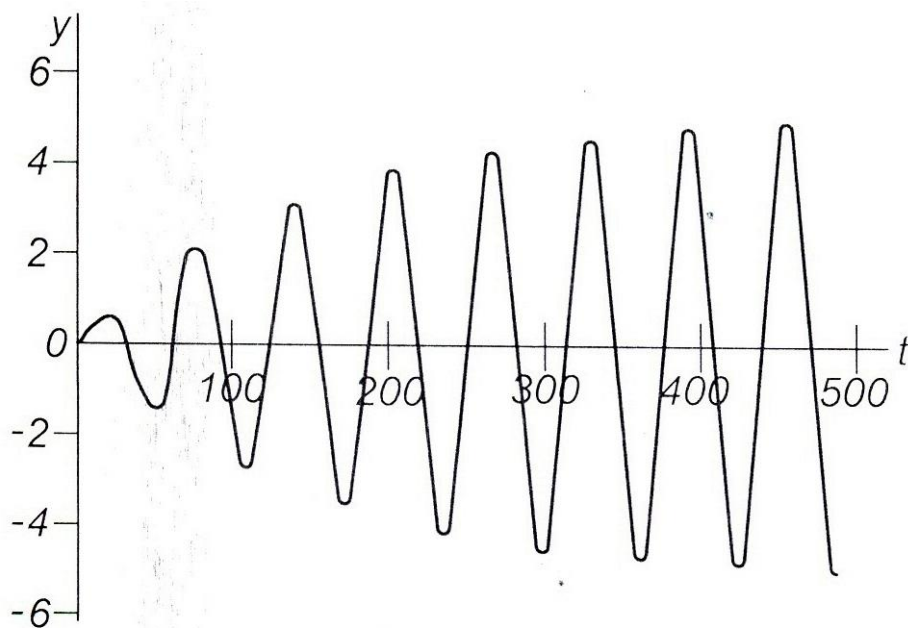


Рисунок 2.11. – Розвиток резонансного збільшення вигину шини у разі
 $\omega = \omega_0$.

2.4.3. Режим биття шинного прольоту.

Якщо частота струму ω і частота власних коливань ω_0 шини близькі, але не співпадають, і якщо можна прийняти $\delta=0$, то рівняння (2.51) приймає вигляд:

$$y = k \cdot (\sin(\omega \cdot t) - \sin(\omega_0 \cdot t)), \quad (2.53)$$

або

$$y = 2 \cdot k \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega + \omega_0}{2} \cdot t\right), \quad (2.54)$$

де величину $2 \cdot k \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right)$ можна розглядати як амплітуду, що гармонічно змінюється з частотою $\frac{\omega - \omega_0}{2}$ і описується огинаючою кривою (рис. 2.12), на якій можна виділити пучності 1 і вузли 2. При цьому коливання вигину y відбуваються з частотою $\frac{\omega - \omega_0}{2}$, а їх період

$$T = \frac{1}{f} + \frac{1}{f_0} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} + \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0}.$$

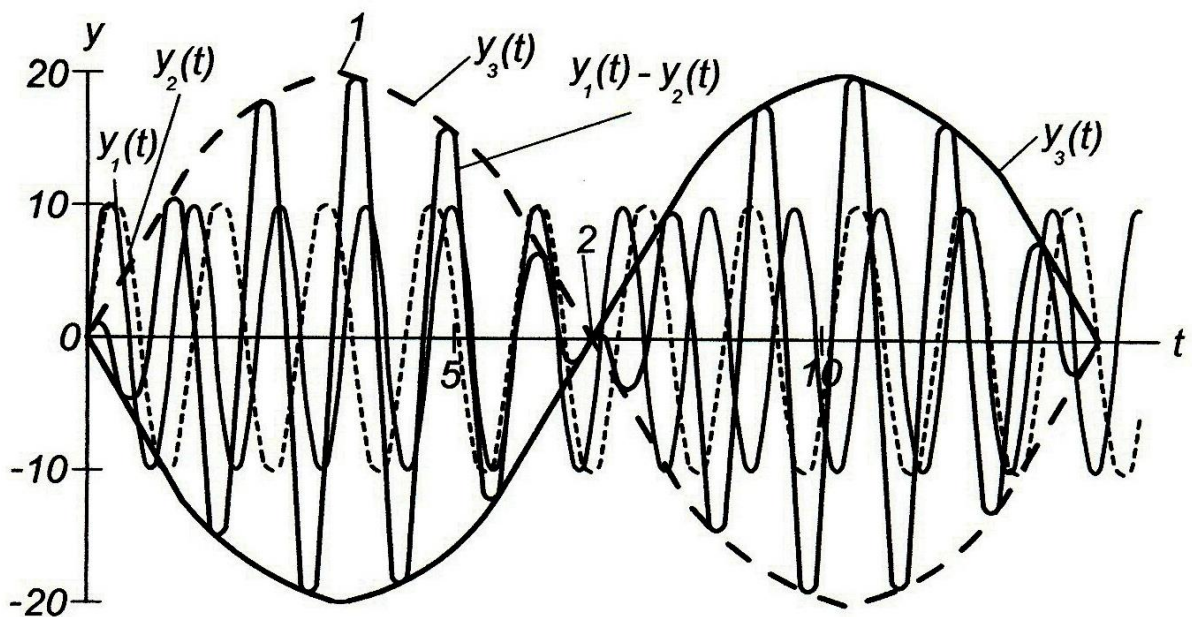


Рисунок 2.12. – Вигин у середині шини як функція часу t за умови $\omega \approx \omega_0$: 1 – пучності коливань; 2 – вузли коливань (биття коливань).

2.5. Електродинамічна стійкість апаратів

Електродинамічною стійкістю апаратів (ЕСА) називають їх здатність протистояти всіляким електродинамічним зусиллям та впливам атмосферних факторів. ЕСА характеризується механічною міцністю елементів електричного апарату.

Механічна міцність елементів апарату залежить від багатьох величин: величини електродинамічних зусиль, їх напрямлення, тривалості дій, стрімкості зростання електродинамічних зусиль, їх попадання в механічний резонанс, конструкції контактів тощо.

У установках змінного струму стійкість апарату перевіряють при струмах к.з. і характеризують амплітудою $I_{y\partial}$ ударного струму або ударним коефіцієнтом:

$$k_y = \frac{I_{y\partial}}{\sqrt{2} \cdot I_{ном}}. \quad (2.55)$$

Додаткову механічну міцність електричного апарату перевіряють з урахуванням дії вітру (іноді навіть місцевих поривів ураганної сили), голольоду (іноді до 4 см при морозі до -40°), вологи (дощу) тощо.

2.6. Програма обчислення струмів короткого замикання і електродинамічних зусиль та робота з програмою

2.6.1. Загальний опис роботи програми

Схема заміщення, викладений у теоретичній частині алгоритм обчислення струмів к.з. і електродинамічних зусиль, а також програма, яка написана у середовищі MathCAD, дозволяють змінювати параметри елементів кола к.з., масу шини, і проводити математичні дослідження коливань шини як функції цих параметрів і їх комбінацій.

Для накопичених даних при складанні звіту про виконання лабораторної роботи потрібно виконати такі дії:

- відкрити програму в програмному пакеті MathCad;
- заповнити вхідні параметри, необхідні для розрахунку напруги і струмів в шинках;
- після одержання графіків напруги і струмів заповнити поля вхідних даних, що відповідають розрахунку електродинамічних зусиль в шинках під дією струму короткого замикання.

Користуючись клавіатурою, зробити відповідне пояснення для подальшого складання протоколу.

2.6.2. Приклад використання програми

2.6.2.1. Рівняння струмів

Примусова складова струму

$$I_{pr}(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t < t_{vkl} \\ I_m \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_{vkl}) + \theta - \varphi] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Вільна складова струму

$$i_v(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t < t_{vkl} \\ -I_m \cdot \sin(\theta - \varphi) \cdot e^{\frac{-(t-t_{vkl})}{\tau}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Сумарний струм

$$i'(t) := i_{pr}(t) + i_v(t)$$

2.6.2.2. Обчислення електродинамічних зусиль

$I(t) := I_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$ – усталений струм КЗ

$$k := \frac{A'}{2}$$

$$P_m := k \cdot I_m^2$$

$$P(t) := \frac{P_m}{2} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \omega \cdot t))$$

$$P_{cp} := \frac{P_m}{2}$$

Струм з вільною складовою (при $\theta = \frac{3 \cdot \pi}{2}$):

$$i1(t) := I_m \cdot \left(e^{\frac{-t}{\tau}} - \sin(\omega \cdot t) \right)$$

$$P1(t) := k \cdot i1(t)^2$$

$$P1_m := k \cdot k_{yd}^2 \cdot I_m^2$$

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + k_t \cdot \frac{dy}{dt} + W \cdot y - P(t) = 0 \text{ — рух шини}$$

2.6.2.3. Рух шини великої довжини

Оскільки маса велика, то

$$\delta = \frac{k_t}{m} \text{ — показчик загасання коливного процесу; } j = \sqrt{-1}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{m}} \text{ — частота власних коливань; } p(z) = \left(|z| \cdot \arg(z) \cdot \frac{180}{\pi} \right)$$

$$\alpha_1 := -\delta + j \cdot \omega_0; \alpha_2 := -\delta - j \cdot \omega_0$$

$$B = \frac{P_{CP}}{W}; \psi = a \tan\left(\frac{\omega_0}{\delta}\right)$$

$$D_0 = \frac{-B}{\sin \psi}$$

$$y(t) = \frac{P_{CP}}{W} \cdot \left(1 - \frac{e^{-\delta \cdot t}}{\sin \psi} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \psi) \right) \text{ — описує рух шини}$$

$$y1(t) = k \cdot (1 - e^{-\delta \cdot t}) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \text{ — рух шини у резонансному режимі}$$

2.6.2.4. Режим биття шини

$$\omega = 314.159; \omega l_0 := 280$$

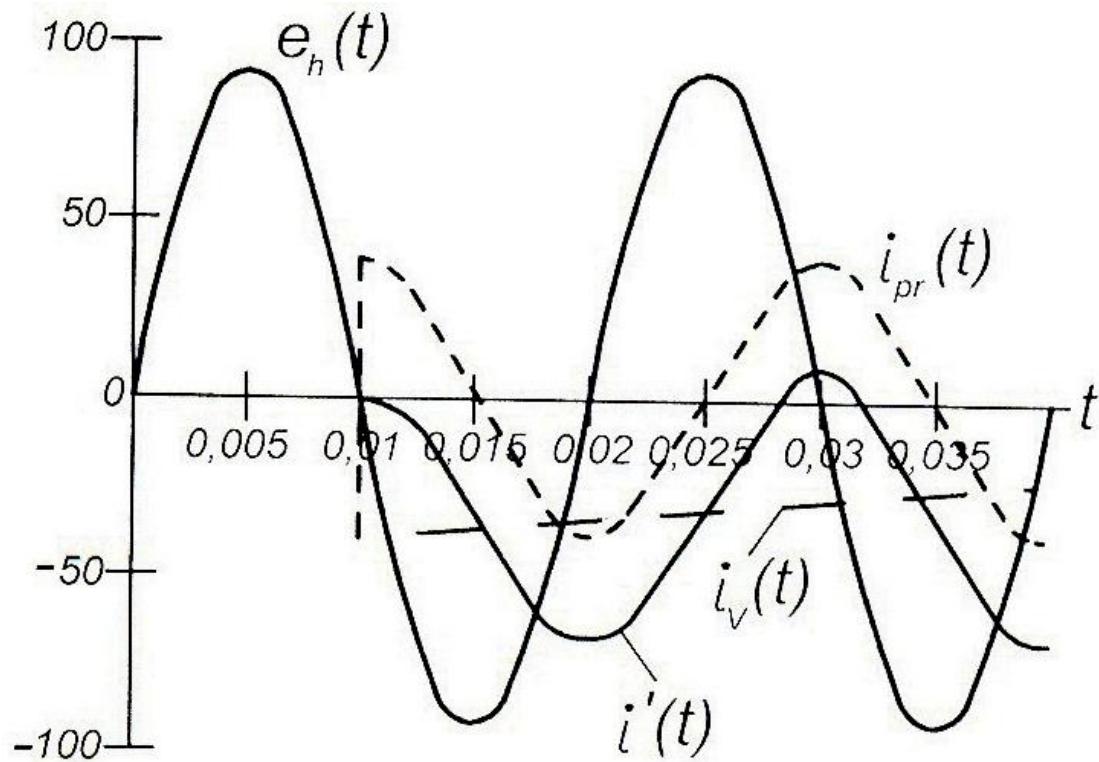
$$y1(t) := k \cdot \sin(\omega \cdot t); y2(t) := k \cdot \sin(\omega l_0 \cdot t)$$

$$y'(t) := y1(t) - y2(t)$$

$$y''(t) = 2 \cdot k \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega l_0}{2}\right)$$

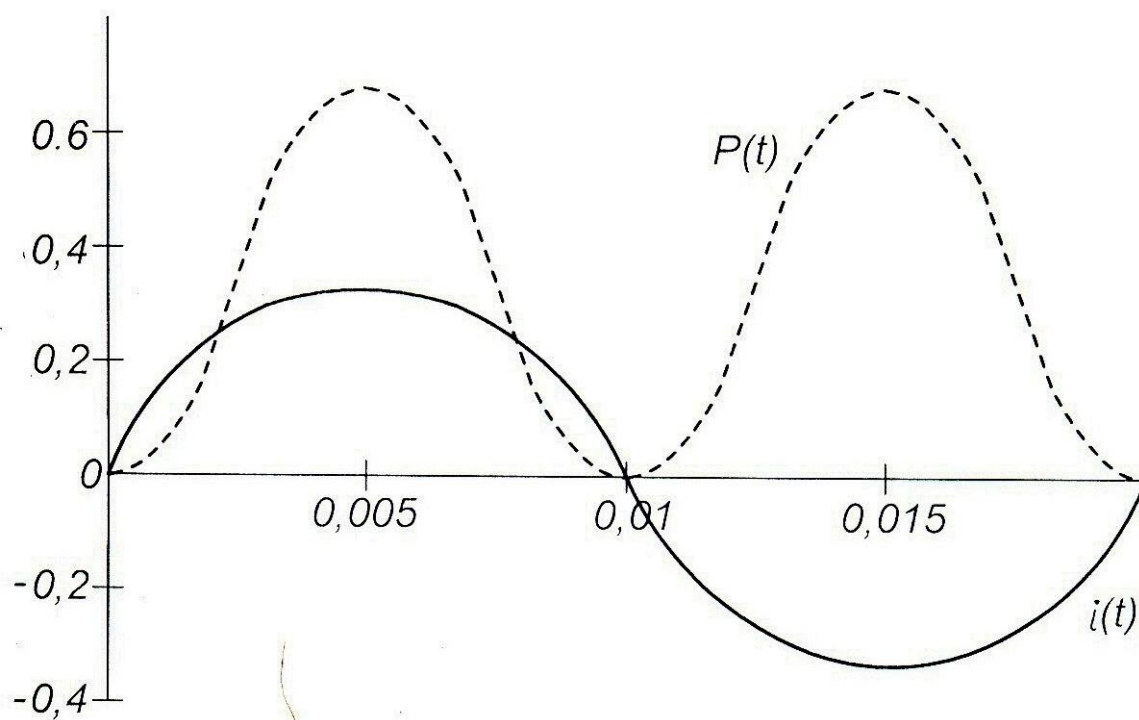
$$T1 = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{1}{\omega} + \frac{1}{\omega l_0} \right).$$

2.6.2.5. Осцилограма струму зі складовими

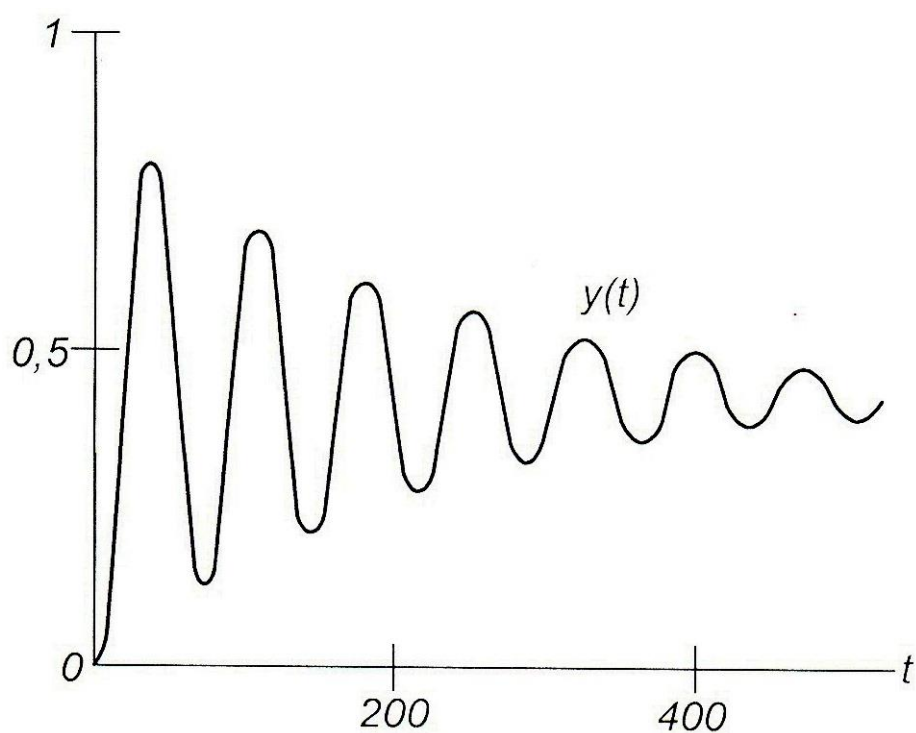


Примітка: графічні залежності $i'_t(t)$, $i_{pr}(t)$, $i_v(t)$ зменшено за розміром у 100 разів.

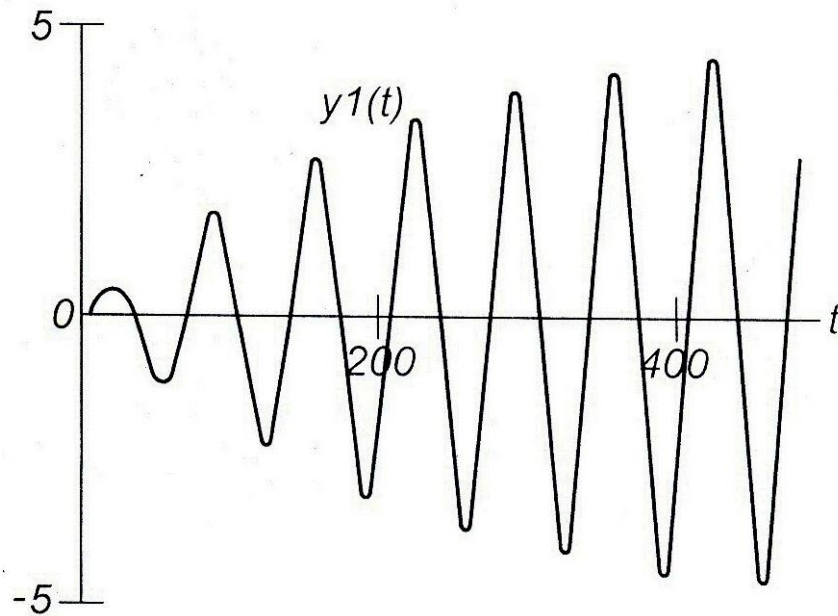
2.6.2.6. Осцилограма періодичного струму та електродинамічних зусиль



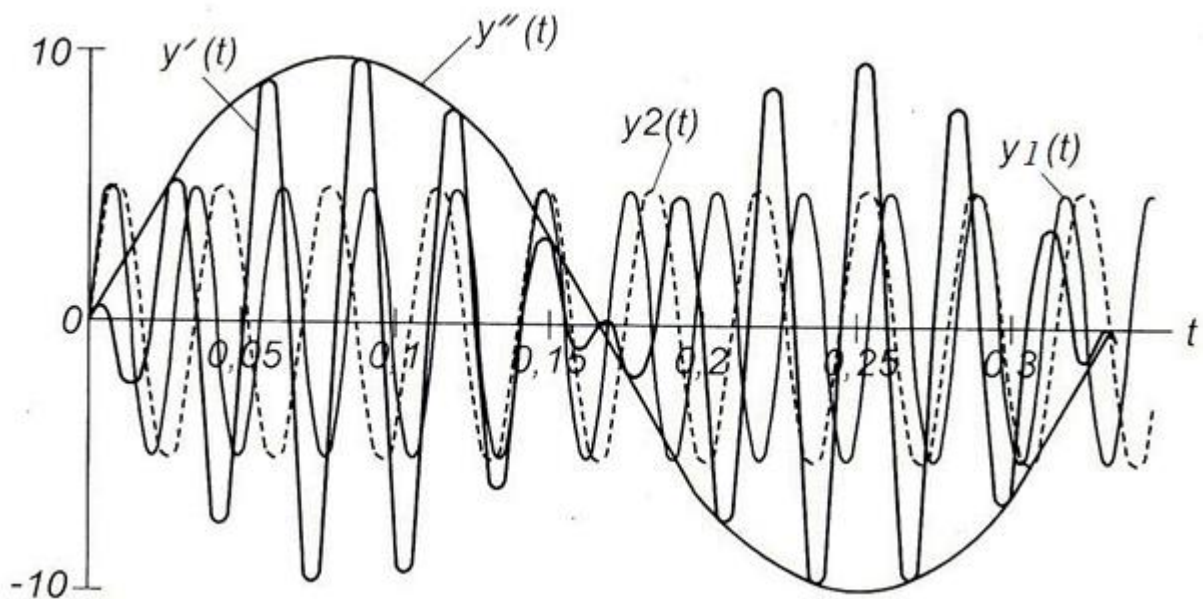
2.6.2.7. Вигин шини



2.6.2.8. Рух шини у резонансному режимі



2.6.2.9. Вигин у середині шини за умови $\omega \approx \omega_0$ (биття коливань)



2.7. Завдання

2.7.1. Методика виконання досліджень на комп'ютерній моделі

2.7.1.1. Визначити просторове розміщення електричних апаратів у розподільних пристроях внутрішнього (закритого) типу, особливу увагу звертаючи на розміщення шинних конструкцій (рис. 2.1 і 2.2).

2.7.1.2. Провести теоретичний аналіз впливу на величину і характер струму короткого замикання (СКЗ) таких параметрів кола, як індуктивність

та активний опір, а також впливу цих параметрів на аперіодичну складову струму.

2.7.1.3. Провести дослідження з використанням програм для розрахунку струмів к. з., дані занести до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Момент виникнення к. з.	$t_1 = 0,001$ с			$t_2 = 0,002$ с			$t_3 = 0,003$ с			$t_4 = 0,004$ с		
Параметри	$I_{уд}$	$K_{уд}$	I_m	$I_{уд}$	$K_{уд}$	I_m	$I_{уд}$	$K_{уд}$	I_m	$I_{уд}$	$K_{уд}$	I_m
Індуктивність кола, Гн												
Опір кола, Ом												

Примітка: $I_{уд}$ - ударний струм, $K_{уд}$ – ударний коефіцієнт струму кола КЗ, I_m – амплітуда примусового струму.

2.7.1.4. За отримуваними значеннями досліджуваних величин побудувати відповідні графіки, провести їх аналіз та дати висновки.

2.7.1.5. Провести теоретичний аналіз впливу параметрів струмів к. з . (ударний, сталий тощо) на величину електродинамічних зусиль, що діють на шини розподільних пристроїв. Аналіз провести на основі програми для розрахунку електродинамічних зусиль впливу струму на характер коливання шинного прольоту в залежності від частоти ω_0 його власних коливань. Дані занести до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

ω_0				
Характер коливань				

2.7.1.6. Додати до протоколу роботи наступні графіки:

Графік струмів при КЗ в лінії.

Осцилограму струму та електродинамічних зусиль в шинях.

Графік залежності вигину шинного прольоту від часу дії струму КЗ.

Графік руху (коливань) шини в режимі резонансу.

Графік вигину в середині шинного прольоту в режимі биття шин.

2.7.1.7. Провести аналіз отриманих даних, зробити висновки.

2.8. Варіанти завдань до лабораторної роботи

№ варіант у	ω_0 , 1/с	U_n , кВ	L , кМ	x' , Ом/к м	$c' \cdot 10^{-9}$, Ф/кМ	r' , Ом/к м	m , кг	k_t , Н·с/м	w , Н/м
1	200	110	50	0,409	8,865	0,251	50	0,3	0,9
2	210	150	60	0,425	8,282	0,184	60	0,35	0,85
3	220	220	70	0,425	8,512	0,098	70	0,4	0,8
4	230	110	80	0,325	10,823	0,065	80	0,45	0,75
5	240	220	90	0,291	11,459	0,042	90	0,5	0,7
6	250	110	100	0,396	9,177	0,163	100	0,55	0,65
7	260	150	110	0,429	8,321	0,163	110	0,6	0,6
8	270	220	120	0,432	8,378	0,121	120	0,65	0,65
9	280	150	130	0,318	11,141	0,065	130	0,7	0,7
10	290	220	140	0,288	12,414	0,042	140	0,75	0,75
11	300	110	150	0,409	9,177	0,251	50	0,7	0,8
12	310	150	160	0,432	8,334	0,121	60	0,65	0,85
13	320	220	170	0,425	8,512	0,098	70	0,6	0,9
14	330	110	180	0,331	11,141	0,065	80	0,55	0,85
15	340	220	190	0,285	12,414	0,042	90	0,5	0,8
16	350	110	200	0,396	9,177	0,251	100	0,45	0,75

17	360	150	210	0,437	8,356	0,098	110	0,4	0,7
18	370	220	220	0,432	8,378	0,098	120	0,35	0,65
19	380	150	230	0,318	10,823	0,065	130	0,3	0,6
20	390	220	240	0,292	11,459	0,042	140	0,4	0,65
21	400	110	250	0,409	8,865	0,163	50	0,5	0,7
22	410	150	260	0,435	8,369	0,163	60	0,6	0,75
23	420	220	270	0,425	8,512	0,121	70	0,7	0,8
24	430	110	280	0,324	10,823	0,065	80	0,6	0,85
25	440	220	290	0,291	11,459	0,042	90	0,5	0,9
26	450	110	300	0,396	8,865	0,163	100	0,4	0,85
27	460	150	310	0,441	8,259	0,121	110	0,3	0,8
28	470	220	320	0,425	8,378	0,098	120	0,4	0,75
29	480	150	330	0,319	11,141	0,065	130	0,5	0,7
30	490	220	340	0,292	12,414	0,042	140	0,6	0,65

Контрольні питання

1. Де у галузі електроапаратобудування використовуються паралельні шини прямокутного перерізу? Як вони розміщені?
2. Що таке вільний і примусовий струм короткого замикання;
3. Як складаються схеми для обчислення цих струмів?
4. Що таке ударний струм короткого замикання?
5. Як залежить струм короткого замикання від моменту його виникнення?
6. Як взаємопов'язані усталений струм короткого замикання і електродинамічні зусилля, що ними створені?
7. За яких умов набувають розвитку резонансні коливання шини?
8. За яких умов має місце биття шин?
9. Що таке електродинамічна стійкість апаратів?

10. Чим характеризують електродинамічну стійкість апарату у разі однофазного або трифазного струму короткого замикання?
11. Чим можна пояснити відмінність характеру деформації шини у різних за довжиною прольотах у випадку незмінної амплітуди змінного струму?
12. Чи завжди скорочення довжини прольоту (збільшення кількості опорних ізоляторів) сприяє зростанню його динамічної стійкості?
13. Чим пояснюється відсутність стабільного граничного відхилення шини у прольоті з малою частотою власних коливань?
14. Чому у випадку розрахунку динамічної стійкості шинного прольоту враховується можливість резонансу?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Діагностування стану ізоляції високовольтного трансформатора на основі вимірювання нормограм та дефектограм

з дисципліни «Електричні апарати» (4 академічні години)

Мета роботи: вивчити методику та застосувати спеціально розроблену апаратуру для перевірки цілісності ізоляції високовольтного трансформатора при його випробуванні імпульсами напруги та виявлення місця пошкодження на основі вимірювання нормограм та дефектограм.

Теоретичні відомості

В електричних системах та мережах на високовольтні трансформатори і реактори ліній електропередач (ЛЕП) надходять грозові імпульсні електромагнітні хвилі, які зумовлюють у них виникнення складного перехідного електромагнітного процесу. При цьому між обмотками і заземленими деталями, а також між котушками обмоток і між витками обмоток виникають значні перенапруги, які і визначають необхідний рівень ізоляції.

Надійна робота трансформатора забезпечується, з одного боку, захистом його від набігаючих хвиль вентильними розрядниками (РВ) або обмежувачами перенапруг нелінійними (ОПН), створенням грозозахисних підходів тощо, а з другого боку – створенням відповідних грозозахищених обмоток.

Складність теоретичного аналізу електромагнітного процесу у трансформаторі і його наближений характер вимагають проведення експериментальних досліджень, які дозволяють в будь-якій конструкції трансформатора отримати повну картину імпульсних процесів і визначити, якою мірою ця конструкція відповідає вимогам грозостійкості. В зв'язку з цим кожна нова конструкція трансформатора у процесі розробки (на

У сучасній практиці типовою є конструкція трансформатора з концентричним розміщенням обмоток високої (ВН), середньої (СН), та низької (НН) напруг (рис. 3.1). Обмотки ВН і СН найчастіше мають котушкову будову і виконуються багатокотушковими (рис. 3.2).

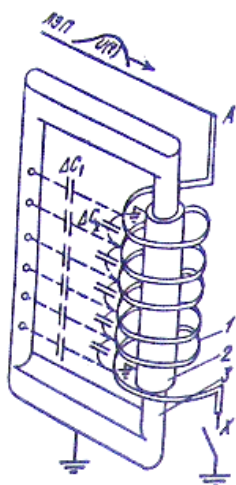


Рисунок 3.1 – Схема конструкції
силового трансформатора: 1 –
обмотка ВН; 2 – обмотка НН; 3 –
магнітопровід (ізоляцію не показано)

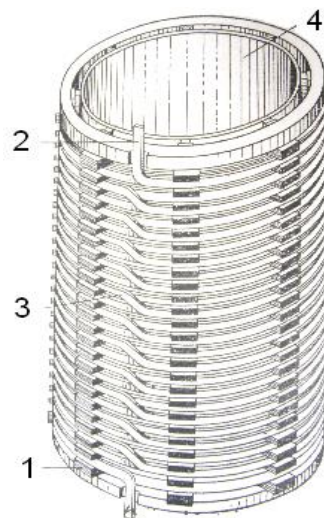


Рисунок 3.2 – Конструкція
катушкової обмотки (фрагмент): 1–
дистанційні прокладки; 2 – кінці
обмотки; 3 – переходи між
катушками; 4 – бакелітовий циліндр

Такий трансформатор при імпульсах можна представити схемою заміщення, яка має ємність C котушок відносно землі, поздовжню ємність K між котушками та індуктивність L котушок (рис. 3.3). Ці параметри вважають віднесеними до одиниці довжини обмотки, взаємну індуктивність кожного витка зі всіма іншими враховують збільшенням L , а активними опорами проводів і електропровідністю ізоляції нехтують. Така схема

заміщення обмотки нагадує схему заміщення довгої лінії, і при цьому обмотку можна характеризувати хвильовим опором у тисячі ом, що значно більше, ніж хвильові опори ліній, які можуть бути підключені до обмотки (табл. 3.1).

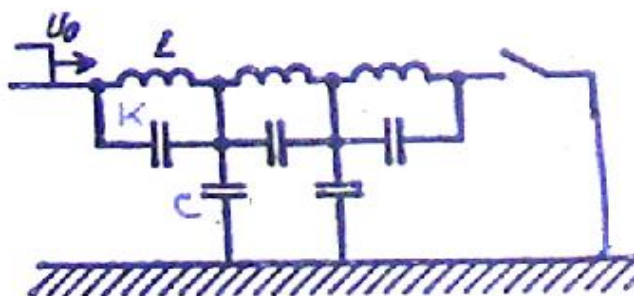


Рисунок 3.3 – Схема заміщення обмотки трансформатора

Таблиця 3.1

Середні величини хвильового опору елементів електричних мереж	
Назва	Хвильовий опір, Ом
Повітряна лінія електропередачі	400...500
Кабельна лінія електропередачі	40..50
Одножильний силовий кабель	20..30
Обмотки силового трансформатора	10000...20000
Обмотка статора генератора	1000...2000

Тому в експлуатації набігаючі з ліній електромагнітні хвилі на вході обмотки заломлюються і рухаються до її кінця. В залежності від режиму нейтралі відбиваються від неї з коефіцієнтом $\beta > 1$ (ізольована нейтраль) або $\beta < 1$ (заземлена нейтраль), рухаються знову до входу обмотки, де знову відбиваються і рухаються до нейтралі. Такий рух електромагнітної хвилі по обмотці з багаторазовим відбиттям від її кінців призводить до появи в обмотці імпульсного коливального струму (рис. 3.4). Струми такого виду

виникають також у інших обмотках трансформатора завдяки ємнісним та взаємодуктивним зв'язкам між ними.

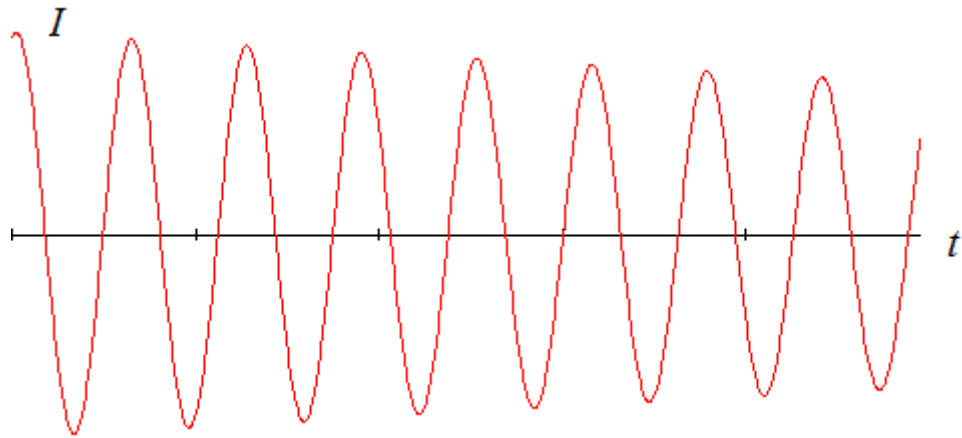


Рисунок 3.4 – Стилїзована осцилограма імпульсного струму в обмотці трансформатора при високовольтних випробуваннях

В результаті таких імпульсних процесів ізоляція між окремими елементами конструкції може бути пошкоджена (між котушками, між витками, між котушкою та заземленим баком тощо).

При експлуатації трансформатора робоча напруга складає 400...800 В/виток. Тому імпульсний пробій ізоляції переходить у силову електричну дугу, з наступним відключенням трансформатора релейним захистом. В подальшому визначення місця пошкодження складає труднощі.

При випробуваннях трансформатора імпульсами високої напруги враховують, що хвильовий опір ЛЕП значно нижчий, ніж хвильовий опір обмоток, і тому згідно діючих стандартів у випробуванні конструкції заземлюють виводи усіх інших обмоток, крім виводів тієї обмотки, на яку подають імпульс напруги.

Для перевірки цілісності ізоляції обмотки з заземленою нейтраллю між її кінцем X і землею вмикають шунт з опором R і індуктивністю L (рис. 3.5), величини яких настільки малі, що напруга на них не впливає на режим та

процеси в обмотці. Якщо випробуванню підлягає обмотка з ізольованою нейтраллю, то шунт R-L вмикають на іншу обмотку (рис. 3.6).

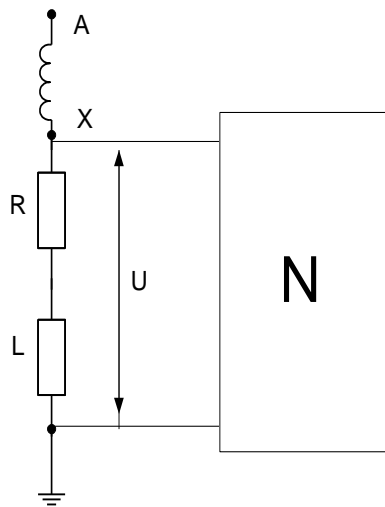


Рисунок 3.5 – Схема ввімкнення шунта R-L при імпульсному випробуванні обмотки ВН з заземленою нейтраллю

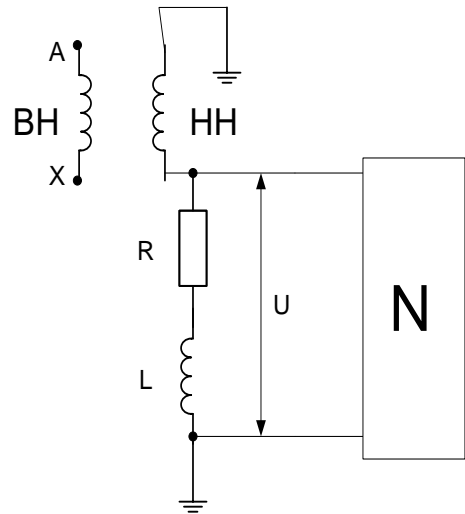


Рисунок 3.6 – Схема ввімкнення шунта R-L при імпульсному випробуванні обмотки ВН з ізольованою нейтраллю

Високочастотний струм i , що проходить по обмотці, створює на шунті високочастотну напругу U (рис. 3.7):

$$U = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}, \text{ яку називають } \textit{нормограмою}.$$

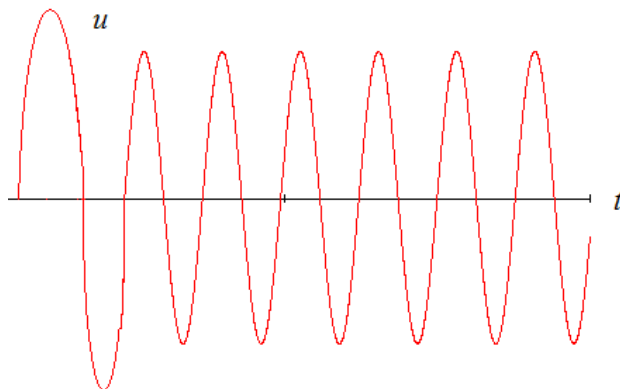


Рисунок 3.7 – Стилїзована форма нормограми на шунті R-L

Якщо у обмотці є пошкодження, наприклад, коротке замикання будь-яких котушок між собою або витків однієї котушки, то при проходженні високочастотного струму i по обмотці в цих короткозамкнених котушках або витках наводиться значний струм $i_{кз}$, що призводить до зміни форми і амплітуди початкового струму i , відповідно, до зміни напруги U на шунті $R-L$. Графік зміни такої напруги у часі називають *дефектограмою*.

В залежності від місця і виду пошкодження ізоляції дефектограми мають різний вигляд. Тому при імпульсному обмірі трансформатора з подачею імпульсів нормованої форми, але низької напруги, моделюють різні типи пошкоджень і отримують *атлас дефектограм*.

При імпульсах такої ж форми, але високої напруги, змінюється амплітуда нормограм і дефектограм, а їх форма (у часі) залишається незмінною.

Якщо при випробуванні при всіх імпульсах отримують на шунті тільки нормограми, то ізоляція трансформатора не пошкоджена. При появі дефектограми за її виглядом можна визначити місце і характер пошкодження.

Як при імпульсному обмірі трансформатора, так і при випробуванні високою імпульсною напругою використовують стандартні імпульси. Повний грозовий імпульс (рис. 3.8) згідно з діючими стандартами має тривалість фронту $T_\phi = 1,2 \pm 0,36$ мкс і значно більшу тривалість імпульсу $T_i = 50 \pm 10$ мкс. Зрізаний грозовий імпульс (рис. 3.9) характеризується передрозрядним часом $T_c = 2,5 \pm 0,5$ мкс та коефіцієнтом $K_\phi \leq 0,6$, який визначають як відношення максимального значення першого півперіоду коливань після зрізу до максимального значення зрізаного імпульсу. Коефіцієнт K_ϕ називають *коефіцієнтом переходу напруги через нуль*.

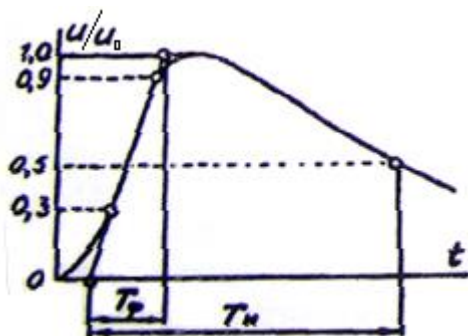


Рисунок 3.8 – Повний грозвий імпульс

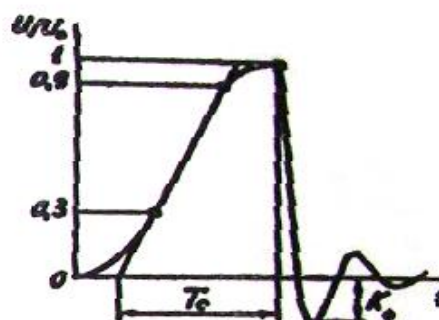


Рисунок 3.9 – Зрізаний грозвий імпульс

Експериментальна установка

Склад установки.

В роботі отримують нормограми та дефектограми, використовуючи комплекс електроустаткування: дві моделі обмоток силового високовольтного трансформатора на 110 кВ, генератор імпульсів напруги, осцилограф, подільник напруги та шунти $L-R$.

Перша модель складається з 36 котушок, причому на обох кінцях обмотки розміщено по одному ємнісному кільцю і по одній гребінці з восьми екрануючих витків. На перших і останніх десяти котушках розміщено також додаткову ізоляцію, яка разом з міжвитковою ізоляцією має сумарну товщину на дві сторони $D=6$ мм. Всі інші котушки мають тільки міжвиткову ізоляцію $D=1,95$ мм (на дві сторони). В обмотці всі масляні канали мають ширину $S=10$ мм, крім каналу між котушками 18 і 19. Ємнісні кільця мають ізоляцію $D=14$ мм (на дві сторони), магнітопровід замінено металевим циліндром. Від лінійного вводу А, нейтралі Х і всіх переходів 2,4,..34 між котушками прокладено відводи до відповідних клем.

Друга модель відрізняється від першої тим, що в ній немає екрануючих витків і додаткової ізоляції на котушках.

Генератор імпульсів напруги (ГІН) забезпечує подачу на модель імпульсів, амплітудою до 40 В, які по формі (у часі) відповідають грозовим як на фронті, так і на спаді (рис. 3.10).

ГІН зібрано на газонаповнених тиратронах. Використання такої елементної бази зумовлено перш за все високою стійкістю газонаповнених ламп до зовнішніх перенапруг, які мають місце під час проведення випробувань. Крім того, якщо виникає внутрішній пробій ізоляції лампи, то після відновлення її попередньої міцності прилад відновлює свої функціональні можливості.

ГІН містить блок синхронізації на тиратронах VL1 і VL2, блок грозових імпульсів на тиратроні VL3 із формуючими елементами і блок зрізу напруги на тиратроні VL4.

Тиратрон VL1 первонаочно закрито керуючою напругою від двопівперіодного випрямляча без фільтруючого конденсатора. Конденсатор C4 заряджено. У кінці кожного півперіоду керуюча напруга зменшується настільки, що VL1 відкривається і C4 розряджається, створюючи на R4 позитивний пусковий імпульс напруги з частотою повторення 100 Гц. Цей пусковий імпульс через R5 перезаряджає C7, відкриваючи із встановленою затримкою тиратрон VL3 блока грозових імпульсів, а через R9 перезаряджає C9, в результаті чого з регульованою затримкою відкривається VL2 і на R13 з'являється негативний імпульс для запуску осцилографа. Регулюючи R9 можна запустити розгортку осцилографа раніше, або пізніше появи грозового імпульсу.

Ємність C6 блока грозових імпульсів заряджається через діод VD4 тільки у позитивні півперіоди анодної напруги, тому цей блок працює з частотою 50 Гц. Таким чином, кожний пусковий імпульс від VL1 через VL2 запускає розгортку осцилографа і тільки кожний другий запускає блок грозових імпульсів. В результаті на екрані осцилографа з'являється крива повного грозового імпульсу напруги, коли блок працює, і нульова лінія, коли блок не працює. Оскільки тривалість післясвітіння екрана значна, то на

ньому одночасно видно криву досліджуваної напруги і нульову лінію, що полегшує роботу дослідника.

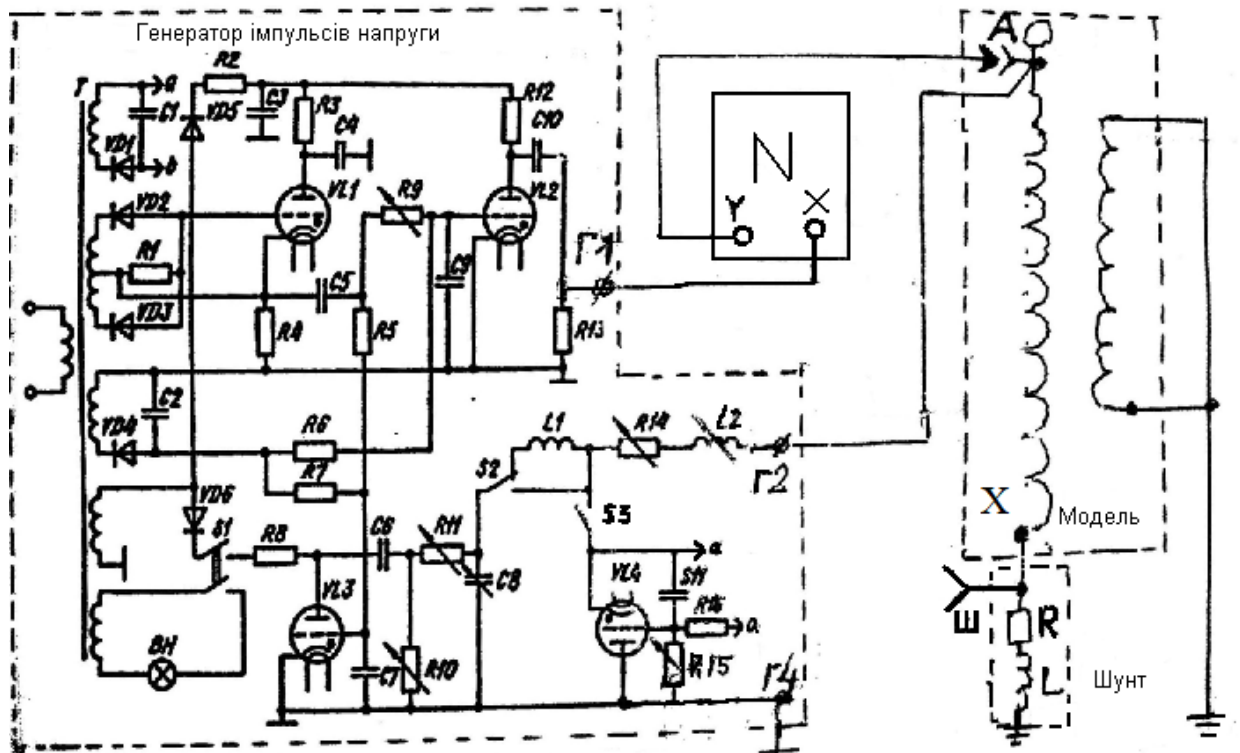


Рисунок 3.10 – Схема устаткування для дефектографування ізоляції силових високовольтних моделей трансформаторів

Якщо вмикач $S3$ ввімкнено, то під час появи грозового імпульсу ємність $C11$ перезаряджається через $R15$, тиратрон $VL4$ відкривається із регульованою затримкою і забезпечує зріз грозового імпульсу, (з розвитком коливань напруги після зрізу).

Формувальні елементи $R10$, $R11$, $R14$, $L1$, $L2$, $C8$ та блок зрізу забезпечують подачу на досліджуваний трансформатор усіх нормованих за формою (у часі) імпульсів.

Шунт $R-L$ вмикають між виводом X обмотки і заземленням, коли досліджується нормограма і дефектограми трансформатора, що працює з заземленою нейтраллю обмотки $ВН$ (рис. 3.11, а) та між виводом обмотки $НН$ і заземленням, коли досліджується нормограма та дефектограми

трансформатора, що працює з ізольованою нейтраллю ВН (рис. 3.11, б). В обох випадках напруга U подається на вхід підсилювача осцилографа. Різні пробої ізоляції обмотки ВН моделюють перемиканням відповідних відводів її котушок.

Для вивчення процесів в обмотках використовують імпульсний осцилограф С1-54 (цифровий осцилограф DSO-1200), який дозволяє досліджувати імпульси тривалістю від 0,02 мкс до 1 с.

Калібраційні мітки дозволяють вимірювати тривалість досліджуваних імпульсів. Для вимірювання параметрів грозових імпульсів є можливість подати вимірювану напругу безпосередньо на вертикально відхиляючі пластини при мінімальних вхідних ємностях.

Методика виконання роботи

Для спостереження імпульсів напруги на лінійному вводі А обмотки або на шунті R-L необхідно синхронізацію осцилографа перевести в режим зовнішнього запуску і на вхід «Х» подати (рис. 3.10) від «Блока синхронізації» генератора пусковий імпульс з гнізда «Г1».

Під час роботи з повним грозовим імпульсом перемикач S2 переводять в положення 1, а гніздо «Г2» з'єднують з лінійним вводом А обмотки. Якщо використовують зрізаний імпульс, то перемикач S2 переводять у положення 2. В обох випадках вхідну клему «У» осцилографа з'єднують гнучким проводом з гніздом А на вході обмотки.

Вмикають осцилограф та ГІН. Вибирають необхідну швидкість розгортки осцилографа та час запуску блока грозових імпульсів, користуючись відповідними регуляторами.

Для вимірювання тривалості імпульсу та тривалості його фронту використовують калібратор осцилографа.

Регулювання тривалостей фронту імпульсу, часу його зрізу виконується за допомогою регулювальних резисторів ГІН.

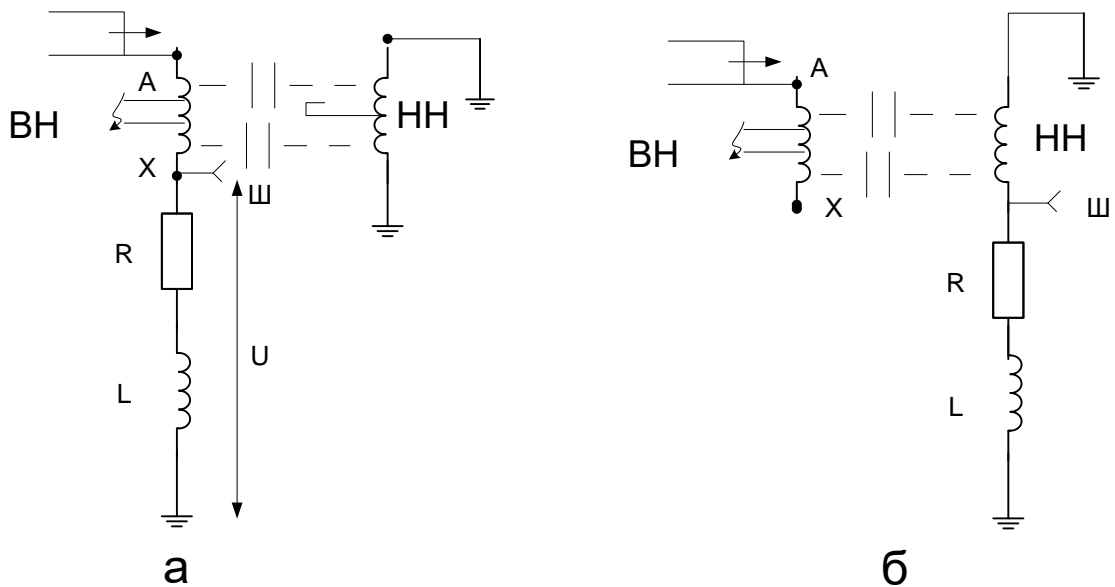


Рисунок 3.11 – Схема ввімкнення шунта R-L для отримання нормограм і дефектограм при високовольтних випробуваннях обмотки із заземленою (а) та ізолюваною (б) нейтраллю.

Вимірювання напруги на шунті R-L для отримання нормограми та дефектограм проводять з використанням підсилювача осцилографа. Для цього вхідну клему «У» осцилографа від'єднують від гнізда А напруги. Після цього провід від клеми «У» осцилографа під'єднують до гнізда Ш шунта R-L.

При цьому потрібно враховувати, що обмотка може досліджуватись у двох режимах: при заземленій нейтралі або ізолюваній. У першому випадку шунт R-L під'єднується до кінця обмотки ВН (рис. 3.11, а), а у другому – до обмотки НН (рис. 3.11, б).

Після отримання нормограми моделюють пробої на різних каналах між котушками обмотки, з'єднуючи спеціальною перемичкою відповідно гнізда 2 і 4, 4 і 6, 6 і 8 і т. д.

УВАГА!!!

Забороняється торкатись неізолюваних елементів експериментального стенду після включення напруги живлення генератора!

Завдання

1. Зібрати схему (рис. 3.10) для подачі на обмотку з заземленою нейтраллю повного грозового імпульсу зі стандартними параметрами. Особливо приділити увагу тому, щоб параметри імпульсу не відхилялись від допустимих меж. Положення регуляторів генератора до закінчення досліджень з повним грозовим імпульсом залишати незмінними.

2. Відключити провід від вхідної клеми «У» осцилографа, і підключити до гнізда Ш на шунті R-L для отримання нормограми (рис. 3.5). Нормограму зафіксувати.

3. Змодельовати пошкодження ізоляції на першому каналі між котушками, з'єднуючи точки А і 2. Отриману при цьому дефектограму зафіксувати і порівняти з номограмою. Зробити висновки щодо можливості виявлення такого пошкодження за цим порівнянням.

4. Послідовно моделювати пошкодження ізоляції між іншими котушками, з'єднуючи точки 2 і 4, 4 і 6, 6 і 8, 8 і 10, 10 і 12, 12 і 14, 14 і 16. Дефектограми зафіксувати. Зробити аналіз отриманих результатів. Дати висновки.

5. Зібрати схему (рис. 3.5 і рис. 3.10) для подачі на обмотку з заземленою нейтраллю зрізаного грозового імпульсу, для чого ввімкнути вимикач S3 і користуючись регуляторами отримати стандартний зрізаний грозовий імпульс.

6. Далі повторити дослідження за п.п. 3,4. Зафіксувати нормограму і відповідні дефектограми. Зробити аналіз отриманих результатів і дати висновки.

7. Провести дослідження за п.п. 1..6 для обмотки з ізольованою нейтраллю, користуючись схемою (рис. 3.6).

8. Після закінчення досліджень скласти звіт, в якому навести всі результати роботи і зробити висновки щодо можливості знаходження місця пошкодження ізоляції за допомогою нормограми і дефектограм при повних і зрізаних грозових імпульсах для обмоток з заземленою та ізольованою нейтраллю.

Контрольні питання

1. Внаслідок яких явищ виникають хвильові процеси в обмотках трансформаторів?
2. Опишіть схеми заміщення обмоток трансформатора та зв'язок між ними при набіганні з ліній грозових імпульсів.
3. Що називають власним коливанням обмотки трансформатора і чим зумовлюється період цих коливань?
4. Який характер має струм в обмотках трансформатора при дії грозових імпульсів?
5. Чим пояснюється виникнення хвилі градієнтів на каналах між котушками обмотки?
6. Що називають нормограмою?
7. Які схеми використовують для одержання нормограм при високовольтних імпульсних випробуваннях обмоток з заземленою та ізолюваною нейтраллю?
8. Як змінюється струм в обмотці трансформаторів у випадку пробою ізоляції між котушками під дією імпульсних градієнтів?
9. Що називають дефектограмами і чим вони відрізняються між собою і від нормограм?
10. Як використовуються нормограми і дефектограми?
11. Як синхронізувати роботу генератора імпульсних напруг та осцилографа?
12. Як за допомогою нормограм та дефектограм визначити, чи мав місце пробій ізоляції трансформатора при імпульсних випробуваннях?
13. Як визначити місце пробою ізоляції, якщо він виник під час таких випробувань?
14. Як визначають місце пробою ізоляції, якщо він виникає під час експлуатації трансформатора?

**Дослідження імпульсної електричної міцності ізоляційних проміжків
високовольтних електричних апаратів**

з дисципліни «Електричні апарати» (4 академічні години)

Мета роботи: вивчення конструкцій електричних апаратів з виділенням характерних ізоляційних проміжків, дослідження їх електричної міцності при імпульсній напрузі.

Теоретичні положення

В експлуатації високовольтних електричних апаратів (вимикачів, роз'єднувачів, запобіжників тощо) існує певна ймовірність дії на них грозових імпульсів, що необхідно враховувати при конструюванні та виготовленні зазначених апаратів.

Електрична міцність різних ізоляційних проміжків залежить від багатьох факторів: розмірів самих проміжків, картини електричного поля між електродами, форми імпульсу напруги, стану повітря або елегазу тощо.

Розвиток імпульсного електричного пробою газових проміжків відбувається аналогічно розвитку електричного пробою під дією постійної або повільно зростаючої напруги. Але амплітуда напруги при імпульсному електричному пробойі іскрового проміжку може суттєво перевищувати постійну пробивну напругу того ж проміжку. Цей ефект пояснюється тим, що імпульсна напруга зростає на протязі часу формування пробою іскрового проміжку. Після завершення повного пробою іскровий проміжок стає провідним і напруга на ньому спадає практично до нуля. Це явище називають зрізом напруги, а сам імпульс називають зрізаним імпульсом напруги.

Якщо імпульс напруги тривалий (наприклад, 50...100мкс), то формування пробою може бути завершено при порівняно невеликій амплітуді імпульсу напруги. Якщо імпульс короткий, то для отримання

пробою необхідне його більш швидке формування, для чого необхідна значно більша напруга. Тому електрична міцність електричного проміжку при коротких імпульсах напруги може бути значно більшою, ніж при довгих імпульсах напруги.

Утворення провідного каналу між електродами відбувається не миттєво. Між моментом появи напруги (початком імпульсу) і моментом його зрізу проходить деякий час, T_3 , який називають часом розряду. Він визначається трьома складовими (рис. 4.1):

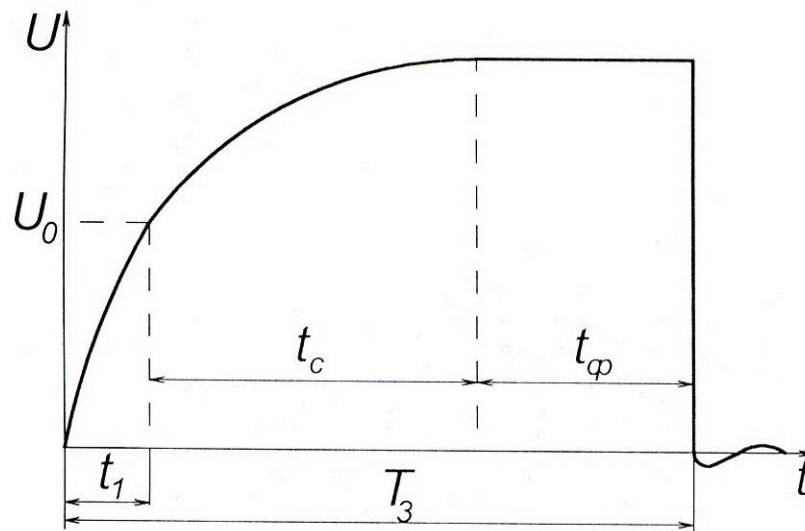


Рисунок 4.1. Складові часу розряду

часом t_1 , на протязі якого напруга збільшується від нуля до початкового значення U_0 , при якому виконується умова самостійності розряду, тобто може початись формування розряду; часу t_c , на протязі якого зовнішні іонізатори створюють «ефективний» вільний електрон, що утворює початкову лавину електронів (так званий час статистичного запізнення) і, власне, час формування розряду t_ϕ .

Складові t_c , t_ϕ і, відповідно, час T_3 є величинами статистичними: навіть при незмінних умовах (температура, тиск, вологість повітря) і однакових імпульсах напруги час розряду змінюється від досліду до досліду.

Збільшення напруги призводить до зростання напруженості електричного поля у міжелектродному проміжку, в зв'язку з чим процеси

іонізації і формування розряду відбуваються швидше, час T_3 зменшується, і розряди можуть відбуватися на фронті імпульсу (рис. 4.2, крива 1).

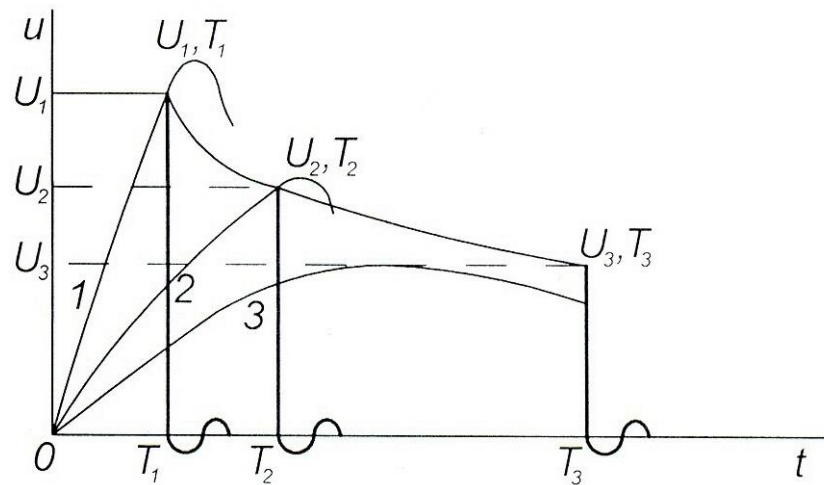


Рисунок 4.2. Методика побудови вольт-секундної характеристики

При зменшенні амплітуди імпульсів напруги розряди відбуваються поблизу амплітуди (крива 2), або на спаді імпульсу (крива 3). У останньому випадку перед зрізом одночасно відбувається два процеси: закінчується формування розряду у міжелектродному проміжку і поступово знижується напруга (на спаді імпульсу). У такому випадку формування розряду починається при напрузі, близькій до максимальної, тому відповідна точка характерних значень U_3 , T_3 визначається амплітудою імпульсу, а не миттєвим значенням напруги зрізу.

В експерименті на ізолятор подають n імпульсів різної амплітуди і отримують n перекриттів його поверхні. Обробка серії з n осцилограм дає систему двох величин:

$$(U_1; T_1), \dots, (U_i; T_i), \dots, (U_n; T_n), \quad (4.1)$$

які встановлюють взаємозв'язок між амплітудою U_i поданого на ізолятор імпульсу і відповідною тривалістю часу T_i .

Ця залежність називається вольт-секундною характеристикою (ВСХ) і найчастіше описується формулою:

$$U_i = A \cdot \sqrt{1 + \frac{B}{T_i}}, \quad (4.2)$$

де U_i - розрядна напруга при імпульсі тривалістю T_i ; A і B - сталі, що залежать від експериментально отриманої системи статистичних величин (4.1).

Недоліком такого способу визначення ВСХ є необхідність мати осцилограф, підключений до високовольтного електроду через подільник напруги. Крім того, такі експерименти займають багато часу, а якщо визначається ВСХ ізоляторів на пробій через діелектрик, то і багато самих ізоляторів.

Вольт-секундну характеристику також можна визначити за двома імпульсами: довгим ($T_d \geq 100$ мкс) і коротким ($T_k \leq 20$ мкс).

Якщо амплітуда U_d довгого імпульсу не більше ніж на 8% перевищує напругу U_0 самостійності розряду (рис. 4.1), то розвиток перекриття по поверхні ізолятора ШС-10Г при довгих імпульсах позитивної полярності $U=108$ кВ відбувається за час $T=4$ мкс (на пологому діапазоні ВСХ). При цьому розряди розвиваються у повітрі по найкоротшому шляху, який для ізолятора ШС-10Г складає 26,5 см.

Таким чином, у розглянутих умовах (довгі імпульси напруги), середня напруженість електричного поля вздовж каналу розряду $E_{cp} \approx \frac{108}{26,5} = 4 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ і

можна прийняти швидкість v розвитку розряду:

$$v = \frac{26,5 \text{ см}}{4 \text{ мкс}} = 6,6 \frac{\text{см}}{\text{мкс}}. \quad (4.3)$$

При короткому у часі імпульсі перекриття відбувається наприкінці фронту T_ϕ , тобто характеризується амплітудою U_k і часом розряду $T_k \approx T_\phi$.

Це пояснюється тим, що при невеликій амплітуді короткого імпульсу і малій швидкості v за коротку тривалість імпульсу розряд «не встигає» досягти протилежного електроду. Якщо імпульс збільшується за амплітудою, то і швидкість v його формування зростає. Розряд настає, коли амплітуда U_k короткого імпульсу достатня для забезпечення такої швидкості v , при якій перекриття проміжку між електродами відбувається за час тривалістю T_k цього короткого імпульсу.

У розглянутому на рис. 4.2 випадку (крива 1) зріз напруги відбувається вже на фронті імпульсу, що визначає відповідно

$$T_K < T_\phi. \quad (4.4)$$

Найчастіше імпульсну електричну міцність апаратних ізоляційних проміжків визначають при подаванні на них від генератора імпульсних напруг (ГІН) повних та зрізаних стандартизованих (за стандартом СНД ГОСТ 1516.2) грозових імпульсів: повного (ПГІ) та зрізаного (ЗГІ). Основними часовими параметрами таких імпульсів являються: для повного – тривалість фронту T_ϕ , тривалість імпульсу T_i ; для зрізаного імпульсу - час розряду T_z , причому ці параметри визначають так, як показано на рис 4.3 та 4.4, і вони повинні бути рівними:

$$T_\phi = 1,2 \pm 0,36 \text{ мкс}; T_i = 50 \pm 10 \text{ мкс}; T_z = 2 \dots 5 \text{ мкс}. \quad (4.5)$$

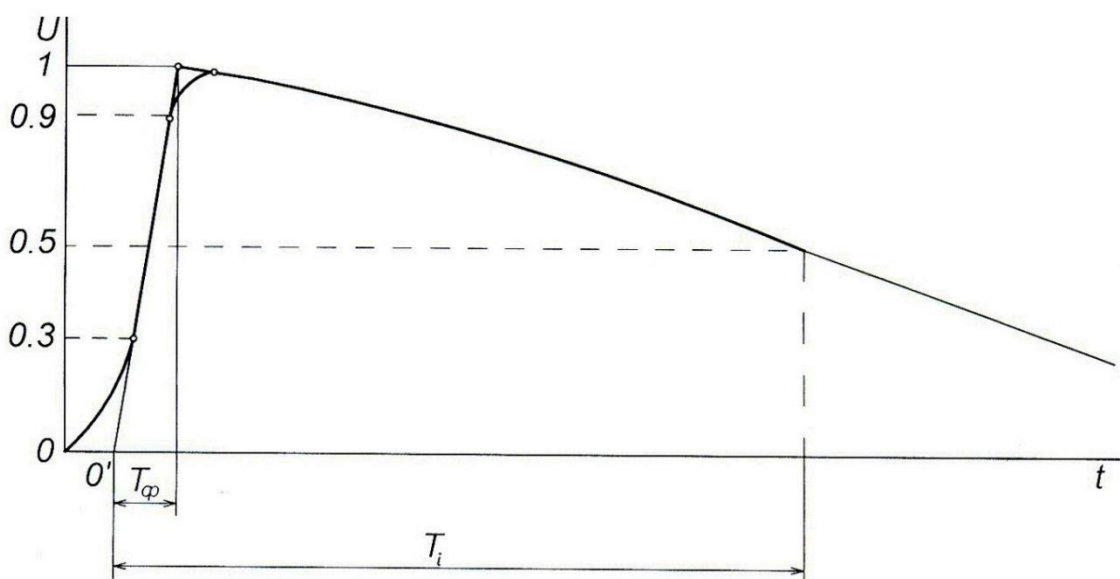


Рисунок 4.3. – Повний грозовий імпульс напруги (за ГОСТ 1516.2).

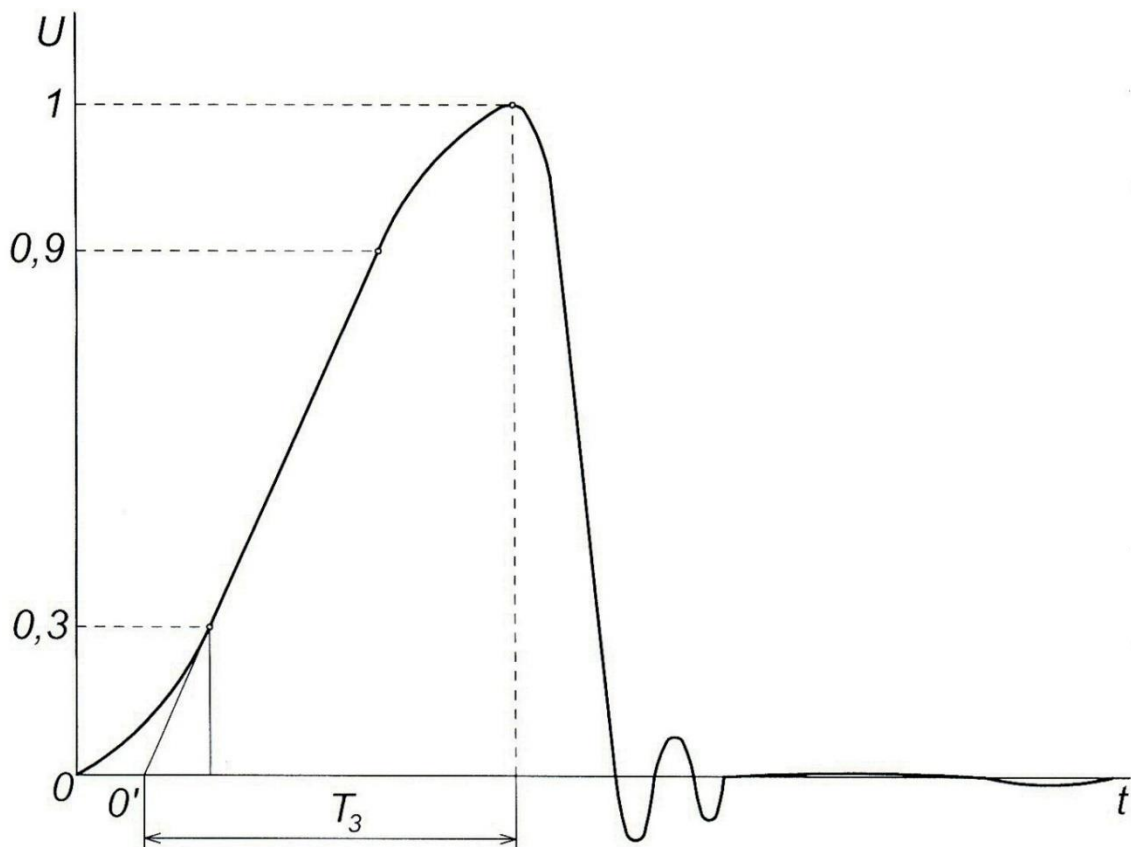


Рисунок 4.4. – Зрізаний грозовий імпульс напруги (за ГОСТ 1516.2)

Експериментальна установка і методика виконання роботи

Дослідження електричної міцності апаратних ізоляційних проміжків та ізоляторів виконується на високовольтному стенді, основою якого є чотиріступеневий генератор імпульсних напруг ГІН-500 з номінальною вихідною напругою 500 кВ (рис. 4.5, 4.6).

Конденсатори ступеней $C_1 - C_8$ розміщені у вертикальному гетинаксовому циліндрі, зовні якого розміщені рідинні зарядні резистори $R_1 - R_9$. Високовольтний трансформатор Т і високовольтні діоди D_1 і D_2 , (якими є кенотрони типу КР₁ і КР₂ зі своїми розжарювальними трансформаторами; на схемі не показані) знаходяться у другому такому циліндрі.

У ту половину періоду високої напруги обмотки трансформатора Т, коли точка V_1 позитивна по відношенні до точки V_2 , зарядний струм $i_{зар1}$ проходить через діод D_1 і через захисні резистори $R_{зах1}$ і $R_{зах2}$: заряджаються ємності C_2, C_4, C_6, C_8 відповідно через зарядні резистори $R_7, R_8, R_9, R_6, R_5, R_4$.

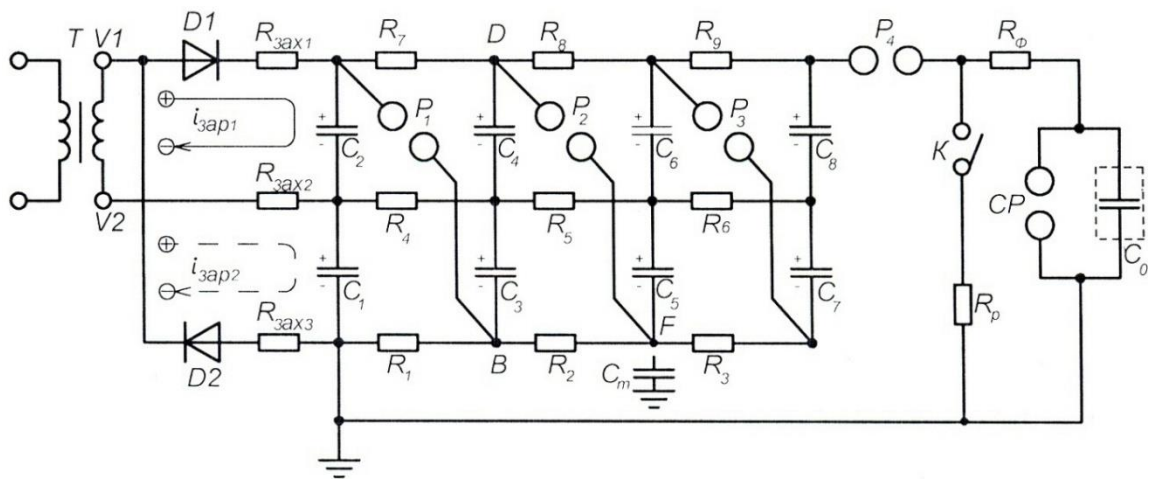


Рисунок 4.5. – Принципова схема експериментальної установки на базі чотириступеневого ГИ-500 (C_0 – ємність об'єкту).

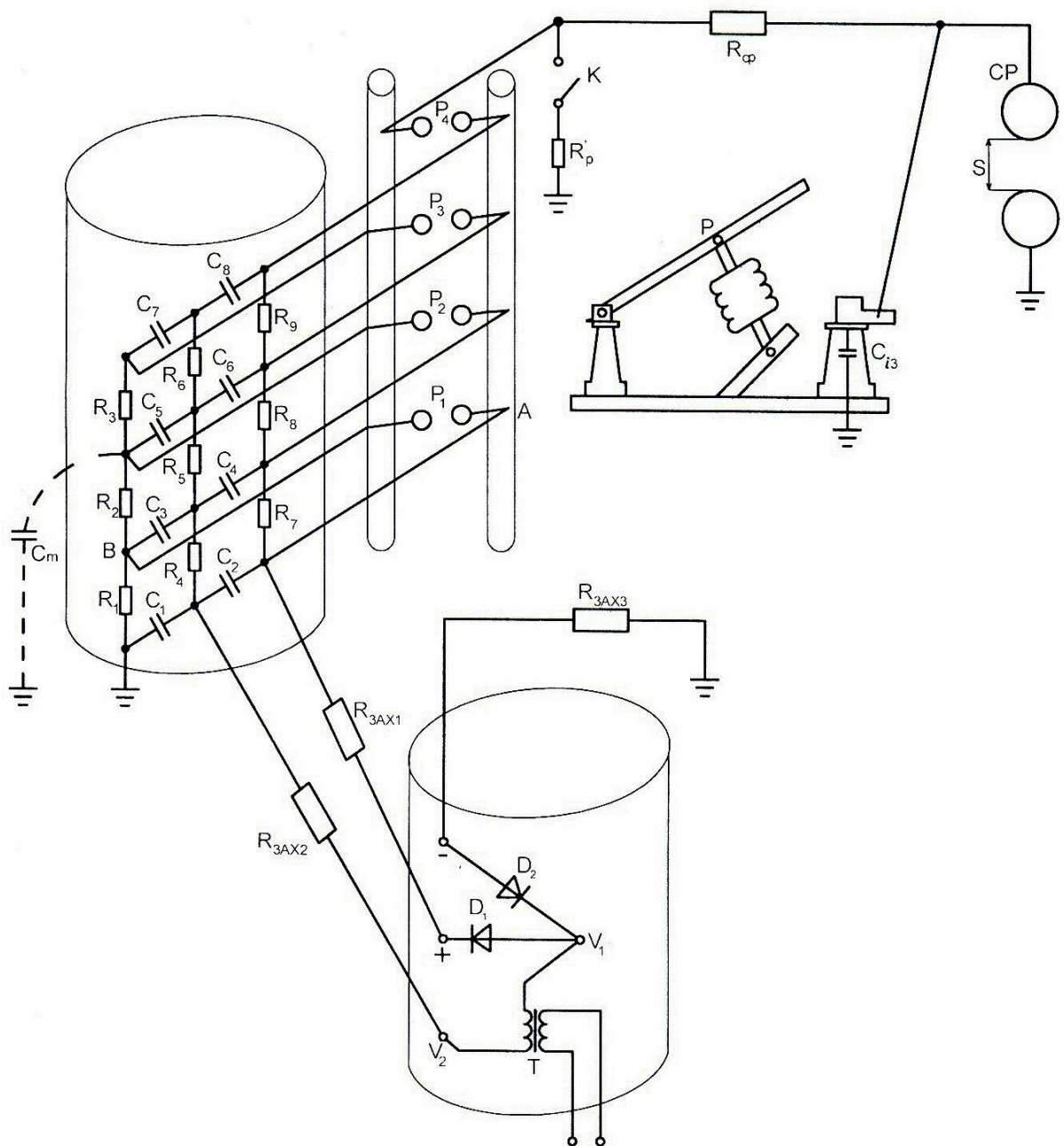


Рисунок 4.6. – Конструктивно-монтажна схема експериментальної установки для дослідження імпульсної електричної міцності ізоляції електричних апаратів (наприклад, роз'єднувача P)

При зміні полярності точок V_1 і V_2 через діод D_2 , резистори $R_{зax2}$, $R_{зax3}$ і через резистори R_4 , R_5 , R_6 , R_3 , R_2 , R_1 заряджаються ємності C_1 , C_3 , C_5 , C_7 .

Оскільки ємності C_1 і C_2 з'єднані послідовно, до сферичного розрядника P_1 прикладена їх сумарна зарядна напруга U_0 (схема з

подвоєнням зарядної напруги). Така ж напруга є на ємностях C_3 і C_4 , C_5 і C_6 , C_7 і C_8 .

Коли по мірі заряду всіх ємностей повільно зростаюча напруга U_0 спричинить пробій розрядника P_1 , точка B також буде мати потенціал U_0 . При цьому точка D буде мати потенціал $2U_0$, оскільки запас енергії у ємностях C_3 і C_4 залишається незмінним, а отже, і різниця потенціалів між точками B і D зберіглася. Оскільки монтажна (часто використовують термін паразитна) ємність C_m між точкою F і землею (стінами лабораторії, тощо) залишається практично незарядженою завдяки великому опору резистора R_2 , до сферичного розрядника P_2 виявляється прикладеною напруга конденсаторів C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , і він також пробивається.

Аналогічно пробиваються розрядники P_3 і P_4 , внаслідок чого всі ємності $C_1 - C_8$ виявляються ввімкнутими послідовно, їх напруги додаються і ГІН переходить у режим розряду (рис. 4.7).

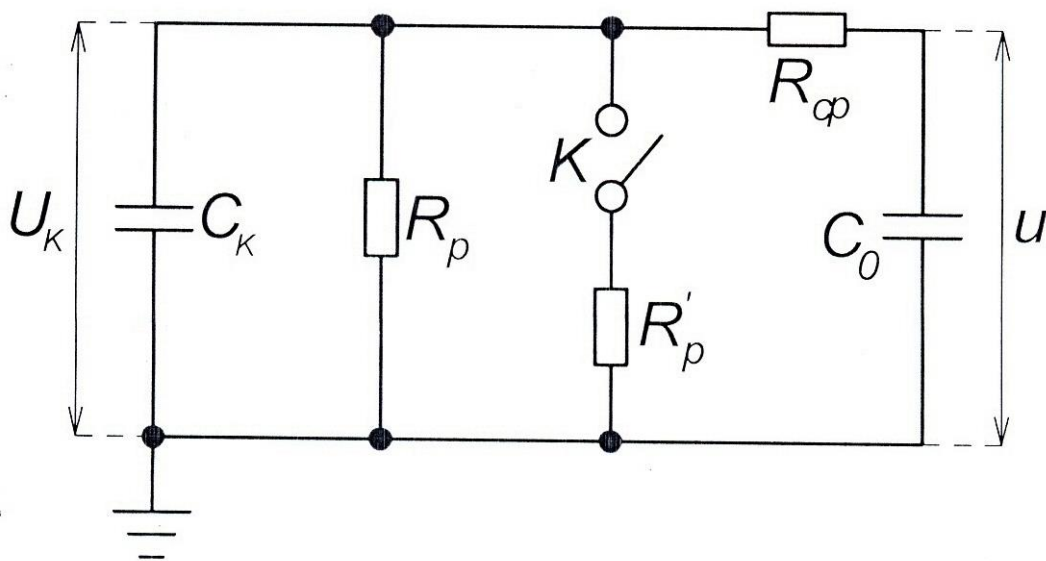


Рисунок 4.7. – Спрощена еквівалентна схема ГІН у режимі розряду

У цій схемі: $C_k = C/n$ - ударна ємність ГІН, що являє собою ємність послідовно з'єднаних ємностей ГІН (у даному ГІН $C=40\text{нФ}$, $n=8$, $C_k=5\text{нФ}$); R_p - власний розрядний опір ГІН, що еквівалентний з'єднанню опорів $R_1...R_9$ при закортчених розрядниках $P_1...P_3$ (у даному випадку $R_p = 120\text{кОм}$); C_0 -

ємність об'єкту дослідження: ємність між електродами електричного апарату, моделей електродів «стрижень - стрижень», «стрижень - площина» тощо, причому C_0 має у даному випадку малу величину; R_ϕ - фронтовий опір (в експериментальній установці $R_\phi = 40 \text{ кОм}$); $R' = 3.4 \text{ кОм}$ – опір додаткового розрядного резистора, який у разі необхідності може бути увімкнений паралельно R_p .

Напруга $U_k = nU_0$ на виході ГІН називається ударною (вихідною, сумарною напругою).

Суттєво, що в цій схемі $C_k \gg C_0$ і $R_p \gg R_\phi$ (відповідно 120 кОм та 40 кОм). Після пробією сферичного розрядника P_4 (його називають «відсікаючим») починається швидкий процес заряджання ємності C_0 через резистор R_ϕ , і напруга u на ємності зростає від 0 до максимальної U_m (рис. 4.8 а, крива 1).

Таким чином, швидкість цього процесу визначає тривалість фронту T_ϕ напруги на об'єкті. При цьому невелика частина заряду переходить на C_0 , а також стікає через R_p . Це призводить до того, що U_m дещо менше, ніж U_0 . Але приблизно можна вважати, що $U_m \approx U_k$.

Тоді напругу на протязі заряджання ємності C_0 (рис. 4.8 а, крива 1), можна описати формулою:

$$u_1 = U_k \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right), \quad (4.6)$$

де $T_1 = R_\phi \cdot C_0$ – постійна перехідного процесу на фронті імпульсу напруги на об'єкті.

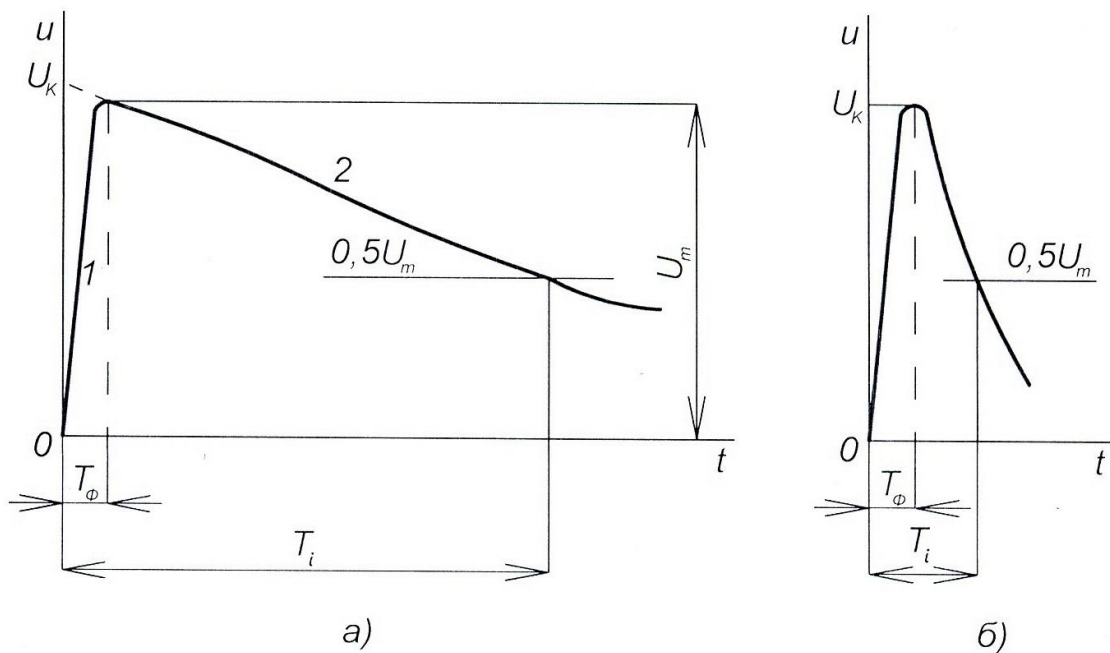


Рисунок 4.8. – Графічне зображення форми імпульсу напруги на об'єкті при спрощеній розрядній схемі ГІН.

Після досягнення напругою u максимуму U_m обидві ємності C_k і C_0 розряджаються через резистор R_p . У цьому випадку напругу на спаді імпульсу можна наближено описати рівнянням (рис. 4.8, крива 2):

$$u_2 = U_m \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}, \quad (4.7)$$

де $T_2 = R_p C_k$ – стала спаду імпульсу.

Через малість ємності C_0 напруга u_1 на ній при підйомі майже не залежить від R_p , а швидкість спаду u_2 практично визначається величиною R_p . При великих значеннях R_p імпульс $u = f(t)$ буде довгим (рис. 1.8а), а при малих значеннях R_p – коротким (рис. 4.8, б).

В лабораторній роботі величина U_k регулюється зміною зарядної напруги U_0 , а тривалість T_i імпульсів – зміною R_p , для чого паралельно $R_p=120$ кОм приєднують $R'_p=3,4$ кОм.

У разі співвідношення $C_k \gg C_0$ і $R_p > R_\phi$, як показує детальний аналіз, можна визначити тривалість фронту T_ϕ і тривалість T_i імпульсу співвідношеннями:

$$T_i = 0,7 \cdot T_l = 0,7 \cdot C_k \cdot R_p, \quad (4.8)$$

$$T_{\phi} = 3,24 \cdot T_2 = 3.24 \cdot C_0 \cdot R_{\phi}, \quad (4.9)$$

Для побудови вольт-секундної характеристики ізоляції електричного апарату використовується 50%-ий метод визначення амплітуди імпульсу. Згідно цьому методу при дії незмінних за формою імпульсів підбирають таку їх амплітуду, щоб пробій досліджуваного міжелектродного проміжку мав місце з імовірністю 50%. Амплітуду при цьому позначають $U_{50\%}$ і називають п'ятидесятивідсотковою, додатково зазначаючи тривалість імпульсу, наприклад, довгих T_{δ} або коротких T_{κ} .

Для вимірювання значення $U_{50\%}$ паралельно об'єкту приєднують сферичний розрядник СР (рис. 4.5, 4.6). У досліді зберігають незмінну тривалість імпульсів. Спочатку амплітуду імпульсів ГІН регулюють так, щоб половина їх вибірки призводила до іскрового розряду у міжелектродному проміжку об'єкта, а половина – між електродами сферичного розрядника. Для цього регулюють відстань S між електродами розрядника СР. Знаючи діаметр D сфери розрядника і значення S та полярність імпульсів, за табл. 4.1 визначають відповідну величину (амплітуду) напруги.

Спочатку на об'єкт подають довгі імпульси (використовуючи R_p у ГІН), вимірюють за 50% - м методом амплітуду U_I розряду і визначають час T_I розряду згідно розглянутих вище умов та використання даних (4.3) про швидкість формування розряду.

Таблиця 4.1

Значення 50%-их пробивних імпульсних напруг сферичного розрядника з діаметром сфер 25см

Відстань S між сфера- ми, см	1	1.5	2	2.4	2.8	3	4	5	6	7	7.5	8	10
Пробивна напруга $U_{50\%}$, кВ	31.7	45.5	59	70	81	86	112	138	163	187	199	211	254

Примітка: за умови необхідності проводиться інтерполяція отриманих даних.

Потім до ГН підмикають резистор R'_p , використовують короткі імпульси з коротким фронтом, параметри яких визначають за співвідношенням (4.9). Потім аналогічно попереднім дослідженням визначають амплітуду U_2 та час T_2 розряду під їх дією.

Знаючи ці данні за співвідношенням (4.2) складають систему:

$$U_1 = A \cdot \sqrt{1 + \frac{B}{T_1}}, \quad (4.10)$$

$$U_2 = A \cdot \sqrt{1 + \frac{B}{T_2}}, \quad (4.11)$$

де сталі A і B необхідно обчислити за отриманими у дослідженнях значеннями U_1 , T_1 і U_2 , T_2 .

Розділивши (4.10) на (4.11), отримуємо:

$$D = \frac{1 + \frac{B}{T_1}}{1 + \frac{B}{T_2}}. \quad (4.12)$$

де $D = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2$.

Безпосередньо з (4.12) маємо:

$$B = \frac{1 - D}{\frac{D}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \quad (4.13)$$

Підстановкою знайденої величини B у рівнянні (4.10) знаходять величину A .

Після цього за рівнянням (4.2) можна побудувати вольт-секундну характеристику (ВСХ) досліджуваної ізоляції електричного апарату.

Техніка безпеки.

Експериментальна установка, яка використовується в даній лабораторній роботі, містить генератор імпульсних напруг ГІН-500, окремі елементи якого перебувають під час роботи під небезпечною напругою. Вся експериментальна установка перебуває на випробувальному полі, огороженому сітчастою металевою огорожею, вхід до якого зачиняється дверцятами на ключ. Елементи керування роботою установки винесені назовні огорожі в пульт керування, який має заземлений корпус.

Під час виконання лабораторної роботи **ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ**:

1. Без дозволу викладача вмикати живлення експериментального стенду.
2. Без дозволу викладача відчиняти дверцята металевої огорожі випробувального поля, на якому знаходиться експериментальна установка, та заходити на випробувальне поле.
3. Використовувати органи керування пульта керування, крім визначених для роботи викладачем.
4. Виконувати будь-які роботи з експериментальною установкою на випробувальному полі до перевірки відключення живлення установки, заземлення її основних елементів та накладення переносного заземлювача на вихід конденсатора C_8 установки.

При виконанні даної лабораторної роботи студенти повинні пройти відповідний інструктаж та виконувати правила техніки безпеки експлуатації електроустановок напругою понад 1000 В.

Завдання

1. Ознайомитись з основними теоретичними положеннями електричного розряду в повітрі.
2. Оволодіти методикою визначення вольт-секундної характеристики за «точками» U_1, T_1 та U_2, T_2 .
3. Вивчити схему експериментальної установки і методику роботи на ній.

4. Оволодіти способом визначення 50%-х розрядних напруг іскрових проміжків.

5. Визначити параметри ГІН для отримання довгих імпульсів. Установити необхідні опори для ГІН.

6. Вибрати і установити для дослідження електроди «стрижень – стрижень» або «стрижень – площа» (за вказівкою викладача).

7. Провести експеримент для визначення 50%-ї електричної міцності вибраного проміжку. Дані занести до таблиці 4.2.

8. Повторити п.п. 5, 6, 7 для роботи з короткими імпульсами. Дані занести до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Параметри довгих та коротких імпульсів

Параметри Форма імпульсу	Амплітуда	Тривалість фронту	Тривалість імпульсу
Довгий імпульс			
Короткий імпульс			

9. Порівняти електричну міцність дослідженого проміжку за умови дії довгих і коротких імпульсів.

10. Провести експерименти з довгими і короткими імпульсами на проміжку між контактом роз'єднувача і землею.

11. Виміряти довжину (y см) розряду вздовж поверхні ізолятора роз'єднувача.

12. Визначити тривалість T_d довгого імпульсу, використовуючи відому швидкість формування розряду за формулою (4.3) і виміряний шлях розвитку розряду.

13. Визначити тривалість T_k короткого імпульсу за формулою (4.9) і відомими параметрами ГІН. Ємність ізолятора роз'єднувача разом з ємністю сферичного розрядника прийняти $C_0=85$ пФ.

14. Співставити електричну імпульсну міцність ізоляційних проміжків між контактами роз'єднувача і між його контактом із землею.
15. У різних масштабах побудувати осцилограми тривалості короткого і довгого імпульсів та їх фронтів.
16. Визначити сталі А та В вольт-секундної характеристики досліджуваної ізоляції.
17. Обчислити і побудувати повну ВСХ.
18. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання

1. Що означають поняття початкової напруги і напруги повного розряду по поверхні ізоляції електричного апарату?
2. Від чого залежить час запізнення розряду?
3. Як визначається вольт-секундна характеристика?
4. Що таке 50% - ва розрядна напруга?
5. Як визначаються часові параметри імпульсу: тривалість фронту T_{ϕ} і тривалість імпульсу T_i ?
6. У чому полягає принцип роботи ГІН?
7. Як регулюють амплітуду вихідної напруги ГІН?
8. Від яких елементів схеми ГІН залежить в основному тривалість імпульсу ГІН?
9. Для чого використовується роз'єднувач?
10. Які вимоги до ізоляції роз'єднувача?

**Дослідження перенапруг на контактах вимикача при відключенні
електричної мережі**

з дисципліни «Електричні апарати» (2 академічні години)

Мета роботи: оволодіти знаннями щодо перехідних процесів, які виникають під час комутації електрообладнання, одержати навички схемотехнічного моделювання електричних кіл змінного струму промислової частоти, в яких відбувається комутація електрообладнання, з метою визначення рівня перенапруг на електрообладнанні при виконанні операцій комутації.

5.1. Теоретичні положення

Перехідні процеси в електричних колах змінного струму промислової частоти відбуваються за кількох причин. Це можуть бути як зовнішні впливи (грозові перенапруги), так і внутрішні (комутаційні операції, перекриття та пробій ізоляції). Під час таких перехідних процесів відбувається зміна одного усталеного режиму коливань електромагнітного поля в елементах електричного кола на інший. Оскільки зміна режимів не може відбуватись миттєво, між двома усталеними режимами роботи електричного кола відбувається перерозподіл енергії електричного та магнітного полів, що може призводити до виникнення в елементах електрообладнання значних за амплітудою струмів та перенапруг. Дослідження перехідних процесів в електричних колах шляхом математичного моделювання дозволяє визначати потенційно небезпечні для ізоляції електричних апаратів елементи електричних кіл, режими комутації цих кіл, заходи безпеки стосовно зовнішніх перенапруг.

5.1.1. Відключення навантаження вимикачами

Вимикачі високої напруги призначені для комутації кіл змінного струму високої напруги та відключення струмів короткого замикання. Вимикачі високої напруги, які використовуються в сучасній електроенергетиці поділяються на масляні (маломасляні), електромагнітні, повітряні, елегазові, вакуумні, при цьому основною відмінністю різних типів високовольтних вимикачів є дугогасне середовище. Згасання електричної дуги струму, який розмикає високовольтний вимикач, відбувається в момент переходу струму через нульове (або близьке до нульового) значення. В цей момент енергія, що виділяється в дузі, є мінімальною, що дозволяє ефективно відводити тепло, яке виділяється в дузі, а також деіонізувати міжелектродний проміжок.

Схему заміщення електричного кола при спрацьовуванні вимикача, що від'єднує навантаження, представлено на рис. 5.1:

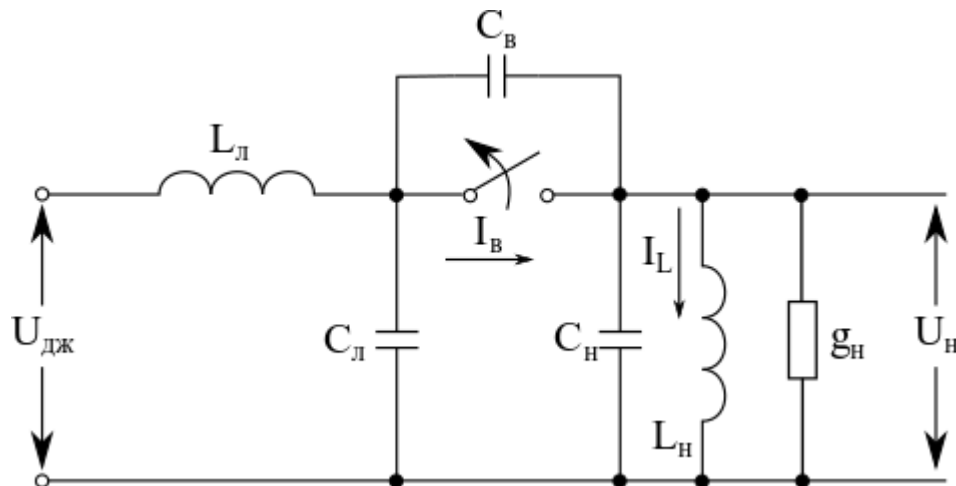


Рисунок 5.1. – Електричне коло для дослідження перенапруг, що виникають на навантаженні при його відмиканні

На рис. 5.1 позначені: $U_{дж}$ – напруга джерела живлення; $L_л$ – індуктивність лінії приєднання; $C_л$ – ємність лінії приєднання; $C_в$ – власна ємність між розмикаючими контактами вимикача; $C_н$ – ємність навантаження; $L_н$ – індуктивність навантаження; $g_н$ – провідність навантаження; $I_в$ – струм у вимикачі; I_L – індуктивна складова струму у навантаженні.

У разі відключення вимикачем трансформатора, L_n , C_n та g_n – це індуктивність намагнічування трансформатора, ємність його обмотки та провідність, еквівалентна втратам у міді і сталі, відповідно.

На рис. 5.2 представлені типові залежності напруги (u) та струму (i) від часу в момент комутації вимикачем навантаження. Величина струму зрізу позначена $i_{зр}$, величина напруги зрізу позначена $u_{зр}$.

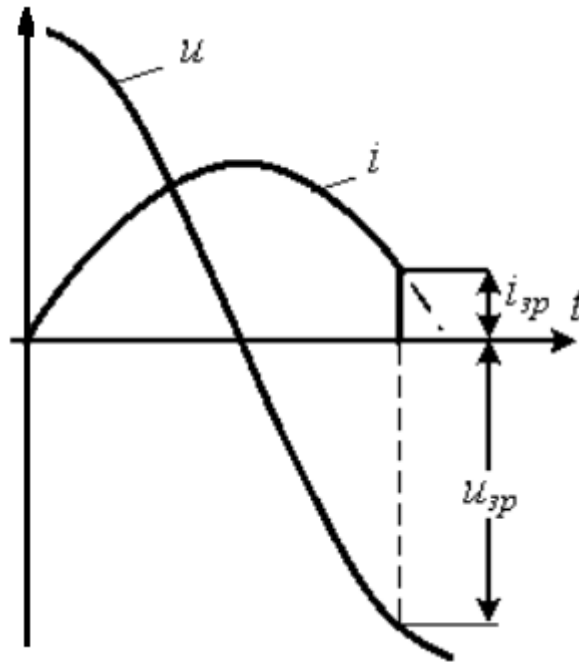


Рисунок 5.2. – Типові параметри струму зрізу та напруги в момент комутації

Власна частота коливань трансформаторів може бути визначена як $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_n \cdot C_n}}$ і складає, зазвичай, еквівалент порядку сотень герц.

Характеристичний опір трансформатора визначається за формулою $z = \sqrt{\frac{L_n}{C_n}}$

та має, зазвичай, порядок десятків кілоом.

В момент комутації, коли у вимикачі відбувається гасіння дуги струму, індуктивна складова струму у навантаженні наближено дорівнює величині струму зрізу $i_{зр}$, а напруга на ємності навантаження дорівнює напрузі зрізу $u_{зр}$ за рис. 5.2.

Після гасіння дуги у вимикачі, на навантаженні виникають коливання напруги, які викликані енергією, що накопичена в індуктивності та ємності навантаження, і можуть бути описані формулою:

$$U_{нав} = \left(i_{зр} \cdot \sqrt{\frac{L_n}{C_n}} \cdot \sin \omega_0 t + u_{зр} \cdot \cos \omega_0 t \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5.1)$$

де τ – стала часу затухання коливального процесу. При цьому, максимальна перенапряга на навантаженні може бути обчислена (якщо знехтувати втратами у міді та сталі) за формулою:

$$U_{max} \approx \sqrt{i_{зр}^2 \cdot \frac{L_n}{C_n} + u_{зр}^2}, \quad (5.2)$$

причому, друга складова у виразі під коренем, як правило, суттєво менша. Це означає, що за наближеними розрахунками максимальна напруга на навантаженні приблизно пропорційна струму зрізу та характеристичному опору навантаження.

Оскільки від моменту початку гасіння дуги в міжелектродному проміжку вимикача до моменту її повного погашення проходить певний час $\Delta t_{зр}$, який відрізняється для різних типів вимикачів і відповідає різкій зміні струму від значення струму зрізу $i_{зр}$ до нуля, напруга на індуктивності навантаження U_L , що відмикається вимикачем, визначатиметься за формулою:

$$U_L = L_n \cdot \frac{\Delta i_{зр}}{\Delta t_{зр}}. \quad (5.3)$$

При дуже малих значеннях $\Delta t_{зр} \rightarrow 0$ значення перенапруги, що виникає, може досягати небезпечних для ізоляції значень.

Також, при малих значеннях ємності навантаження, у порівнянні з індуктивністю навантаження, енергія, що зберіглася в індуктивності навантаження під час зміни струму зрізу від початкового значення до нуля, вивільняється в RLC-коливальному контурі навантаження у вигляді напруги на ємності та теплових втрат в активному опорі. При цьому, якщо

провідність навантаження вважати такою, що мало впливає на згасання коливань у перші періоди коливального процесу, то можна записати:

$$\frac{L_n \cdot i_n^2}{2} = \frac{C_n \cdot U_n^2}{2}, \quad (5.4)$$

або

$$U_n = i_n \cdot \sqrt{\frac{L_n}{C_n}}. \quad (5.5)$$

З виразу (5.5) можна бачити, що найбільші значення перенапруг при коливальному процесі пропорційні квадратному кореню відношення індуктивності навантаження до ємності навантаження.

Якщо коливальний контур представити колом послідовно з'єднаних активного опору R , індуктивності L та ємності C , коливання в цьому контурі можуть мати три різновиди, в залежності від співвідношення величин R , L , C . Якщо $R^2 > 4L/C$, в контурі відбувається затухання струму за аперіодичним законом:

$$i(t) = C_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 t}, \quad (5.6)$$

де C_1 , C_2 – константи інтегрування, які залежать від початкових умов виникнення коливань в контурі (від значень початкового струму $i_{зр}$ в індуктивності та початкової напруги $u_{зр}$ на ємності), а λ_1 , λ_2 – корені характеристичного рівняння контуру:

$$\lambda^2 + \lambda \cdot \frac{R}{L} + \frac{1}{L \cdot C} = 0, \quad (5.7)$$

яке відповідає диференційному рівнянню другого порядку для цього контуру:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{L \cdot C} \cdot i = 0, \quad (5.8)$$

тобто:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4 \cdot L^2} - \frac{1}{L \cdot C}}. \quad (5.9)$$

Якщо $R^2 > 4L/C$, корені характеристичного рівняння (5.7) дійсні, від'ємні та різні. В цьому випадку має місце аперіодичне затухання струму в колі. Якщо $R^2 = 4L/C$, обидва корені цього рівняння однакові, дійсні та від'ємні. В цьому випадку рівняння струму для кола має вигляд:

$$i(t) = (C_1 \cdot t + C_2) \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \quad (5.10)$$

Якщо $R^2 < 4L/C$, в контурі відбувається коливальний процес з затуханням коливань. В цьому випадку струм у колі описується рівнянням:

$$i(t) = (A \cdot \cos(\omega \cdot t) + B \cdot \sin(\omega \cdot t)) \cdot e^{-\frac{R}{2L}t}, \quad (5.11)$$

де A та B – сталі інтегрування, які визначаються з початкових умов; ω – частота коливань, що визначається за формулою:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2}. \quad (5.12)$$

Якщо власний період коливань навантаження, що відмикається вимикачем, є суттєво меншим за час розходження контактів вимикача (що для вакуумного вимикача має значення порядку 15 – 20 мс), на контактах вимикача, що не встигли розійтись на відстань, яка б забезпечувала надійну ізоляцію електричного проміжку, виникає перенапруга, яка може призводити до повторного запалювання електричної дуги в цьому проміжку. Ряд запалювань та згасань дуги в міжелектродному проміжку при розведенні контактів вимикача приводить до зменшення рівня перенапруг на обладнанні, що відмикається, за рахунок витрати енергії, запасеної в індуктивності навантаження на повторні запалення дуги.

При достатньо малому значенні часу зрізу струму можна осцилографувати високочастотні коливання напруги, які протягом короткого періоду часу після моменту зрізу струму згасатимуть в колі контактів вимикача. Такі коливальні процеси можуть виникати з обох сторін контактів вимикача – як з боку джерела напруги промислової частоти, так і з боку

навантаження, проте, як правило, коливання з боку джерела напруги є менш високочастотними та мають менші значення перенапруги.

5.1.2. Перенапруги у випадку відключення індуктивності тиристором

Процес відключення тиристором за наявності індуктивності L навантаження набагато складніший, ніж за відключення активного навантаження (рис. 5.3).

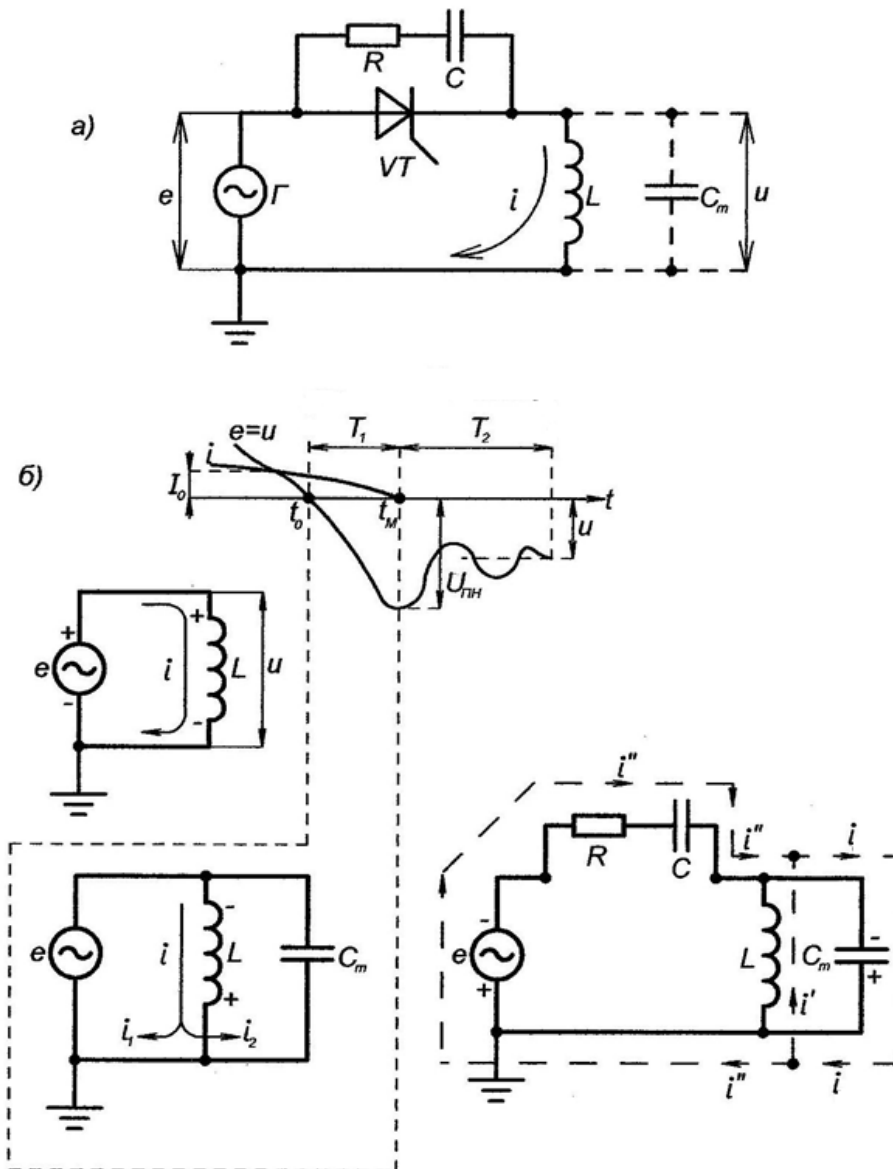


Рисунок 5.3. – Спрощена схема відключення індуктивності тиристором (а) і струми та напруги (б) цього процесу (C_m – монтажна ємність).

За час проходження струму через індуктивність у ній накопичується енергія магнітного поля. У момент часу t_0 , коли електрорушійна сила ЕРС e генератора досягає нуля, запас енергії W_M в індуктивності визначається струмом I_0 , оскільки

$$W_M = \frac{L \cdot (I_0)^2}{2}. \quad (5.13)$$

До моменту часу t_0 тиристор VT відкритий, його опір дорівнює нулю, напруга на індуктивності $u = e$ і має позитивну (додатну) полярність. Струм у гілці $R - C$ відсутній.

Після моменту часу t_0 індуктивність втрачає запас енергії W_M , тобто вона стає джерелом енергії, полярність напруги u на індуктивності L змінюється на протилежну. Але певний час відбувається проходження струму i через індуктивність L у тому ж напрямку, що і в момент часу t_0 .

Частина i_1 цього струму i проходить через генератор Г і відкритий тиристор VT, а частина i_2 протягом інтервалу T_1 забезпечує зарядження монтажною ємності C_m . Найбільше значення напруги на цій ємності в момент часу t_M називають перенапругою $U_{ПН}$ на тиристорі.

У момент часу t_M на ємності C_m негативна (від'ємна) напруга $U_{ПН}$, тиристор VT закритий, тому після моменту t_M ємність C_m розряджається струмом i . Частина струму i у вигляді струму i' проходить через індуктивність L , а інша частина як струм i'' замикається через гілку $R - C$. Підбором величин R та C можна зменшити перенапругу на тиристорі до безпечної величини. Розряд ємності C_m проходить у вигляді швидко згасаючого процесу протягом інтервалу T_2 . Послідовно у часі на тиристорі встановлюється напруга u , яка визначається протилежною полярністю ЕРС генератора.

Тривалість часу T_2 займає десяті долі мілісекунди, але порівняно з періодом 0,02 с промислової напруги цим часом можна знехтувати. Тому надалі будемо вважати, що тиристори закриваються миттєво одразу ж, як тільки настає момент переходу струму у тиристорі через нуль.

5.2. Програмне середовище моделювання

Для моделювання перехідних процесів, що відбуваються в окремих ділянках електричних кіл під час комутації навантаження використовується програмний пакет схемотехнічного моделювання та аналізу **Qucs** (аббревіатура від англійської Quite Universal Circuit Simulator, українською Майже універсальний симулятор електронних кіл) версії 0.0.19. Даний програмний пакет має можливість застосування перекладу інтерфейсу українською мовою, проте більш детальний переклад параметрів налаштування елементів схем, режимів моделювання та відображення результатів може бути доступний в російськомовній версії перекладу його інтерфейсу.

Використовуваний програмний пакет оздоблений відповідною україномовною довідковою системою, що дозволяє опанувати основні навички використання цього програмного продукту в тих чи інших цілях математичного моделювання електричних кіл. Приклад вигляду головного вікна програмного пакету після запуску відповідного ярлика на робочому столі комп'ютера представлений на рис. 5.4. На рис. 5.4 позначені 1 – поле, що відображає зміст вкладинок, розташованих ліворуч від нього; 2 – вкладинка проектів, з якими працює користувач; 3 – вкладинка змісту активного в даний момент проекту; 4 – вкладинка вибору компонентів, з яких складається моделювання для даного проекту; 5 – вкладинки файлів проектів, з якими в даний момент працює користувач; 6 – зміст файлу поточної вкладинки.

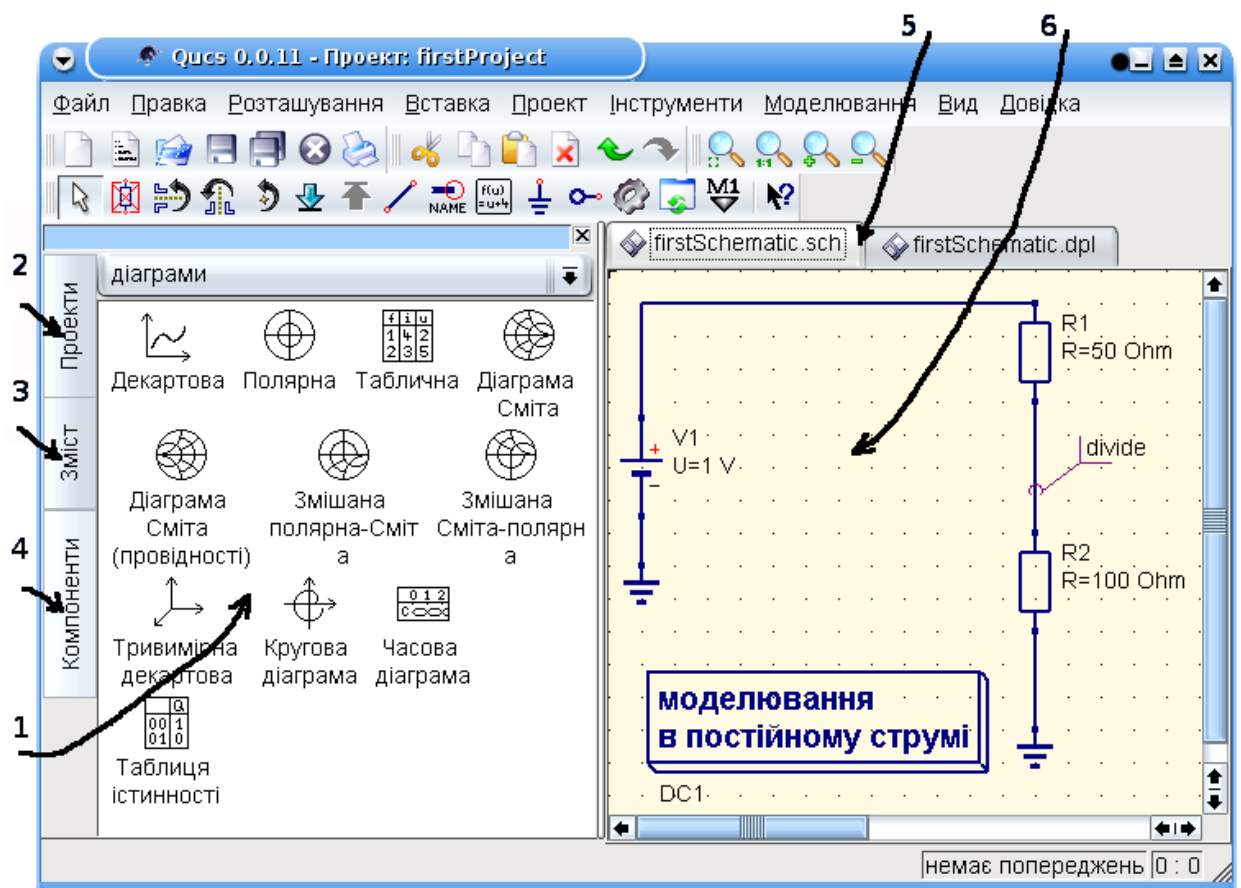






Рисунок 5.4 – Головне вікно програми Qucs з елементами інтерфейсу після її запуску.

В досліджуваних схемах використовуються наступні компоненти з вкладки «Компоненти»:

- «земля», «опір», «конденсатор», котушка індуктивності», «вимикач», «амперметр» з розділу «дискретні компоненти»;
- «джерело напруги змінного струму» з розділу «джерела»;
- «тиристор» з розділу «нелінійні компоненти»;
- «декартова» діаграма з розділу «діаграми»;
- «моделювання перехідного процесу» з розділу «види моделювання».

Для з'єднання компонентів електричної схеми використовуються з'єднувальні провідники, використання яких викликається натисканням

комбінації клавіш Ctrl+E, або натисканням відповідної піктограми  на панелі керування головного вікна. Точки електричної схеми, в яких

необхідно визначати напругу, позначаються мітками, викликати режим додавання котрих до схеми можна за допомогою натискання комбінації клавіш Ctrl+L, або відповідної піктограми  на панелі керування головного вікна програми. Для запуску процесу моделювання використовують клавішу F2, або натискають на відповідну піктограму  на панелі інструментів головного вікна програми. Для встановлення маркера в будь-якій точці діаграми одержаних результатів (для отримання числових значень графічної залежності) необхідно викликати режим додавання маркера натисканням комбінації клавіш Ctrl+B, або натисканням на відповідну піктограму  на панелі інструментів головного вікна програми. Для налаштування параметрів моделювання перехідного процесу використовують вкладинки відповідного вікна за рис. 5.5:

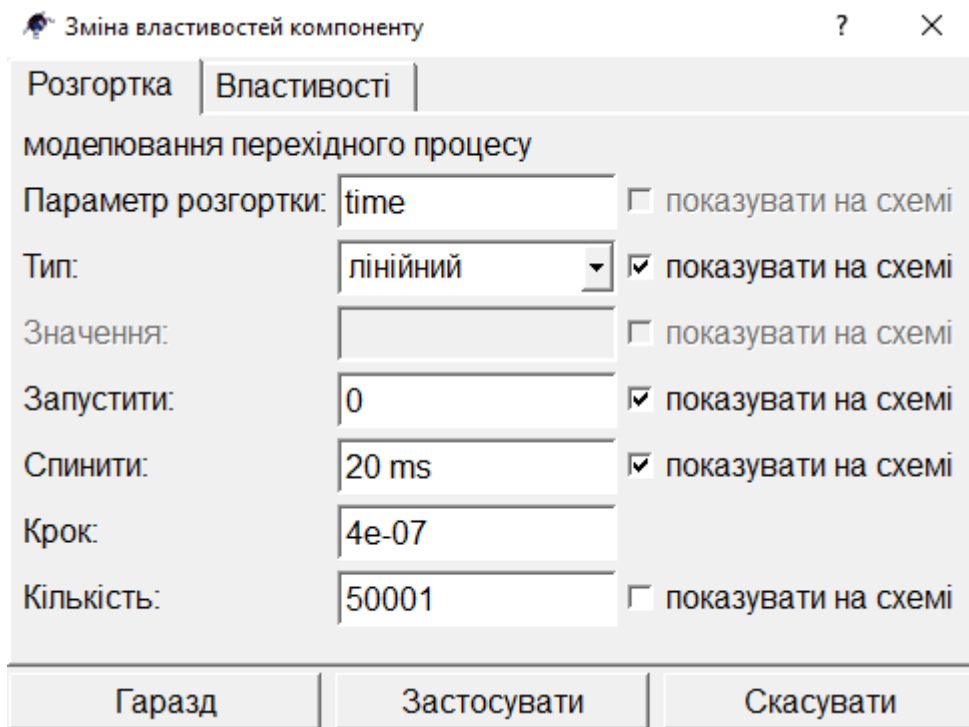


Рисунок 5.5 – Вікно налаштувань параметрів моделювання перехідного процесу

Час початку та закінчення розрахунків вказується в секундах, або мілісекундах (мікросекундах), яким відповідають відповідні літерні

позначення величин. Крок відображає дискретизацію змін у часі, відповідно, кількість точок на результуючому графіку є значенням, пов'язаним з кроком дискретизації. Для налаштування відображення лише частини графіку одержаних результатів проставляють галочки у відповідні елементи, позначені написом «вручну» та зазначають числові границі діапазонів відображення (як у часі, так і по амплітуді величини, яку необхідно відобразити). Приклад налаштувань відображення «за замовченням» – весь діапазон – представлений на рис. 5.6. Для налаштування, дані яких міток або вимірювальних приладів необхідно відображати графічно, використовується вкладинка налаштування даних результатів моделювання, представлена на рис. 5.7. На цій вкладинці можна додати до кривих одну чи кілька змінних з набору даних, змінити колір, тип та товщину лінії, застосувати дві вісі ординат для відображення різних типів даних (напруга та струм, наприклад).

Редагувати властивості діаграми			
Дані Властивості Границі			
Вісь X			
<input type="checkbox"/> вручну	початок	крок	кінець
	0	0.002	0.02
ліва вісь			
<input type="checkbox"/> вручну	початок	крок	кінець
	-80000	20000	80000
права вісь			
<input type="checkbox"/> вручну	початок	крок	кінець
	-0.252284	0.5	2.77512
<div>Гаразд</div> <div>Застосувати</div> <div>Скасувати</div>			

Рисунок 5.6 – Вікно налаштувань границь області відображення графічних результатів.

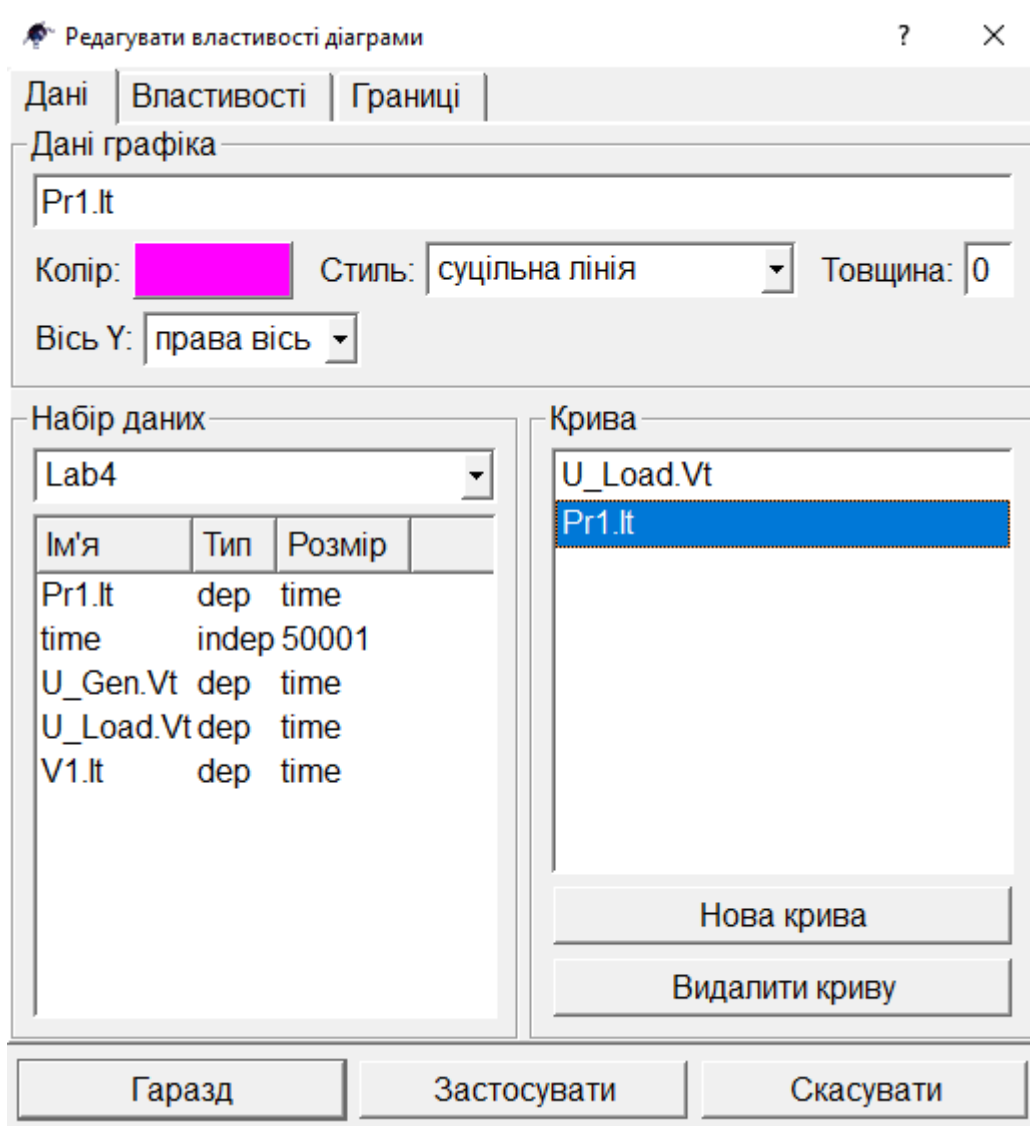


Рисунок 5.7 – Вкладка налаштування відображення графічних результатів моделювання

Для налаштування параметрів джерела напруги змінного струму використовують вікно налаштувань у відповідності до рис. 5.8. Треба бути уважним: при додаванні нового джерела в схему частота f синусоїдальної напруги автоматично встановлюється 1 ГГц!!! Також треба бути уважним при визначенні величини напруги U – програма оперує значенням амплітуди напруги змінного струму, а не його середньоквадратичним значенням.

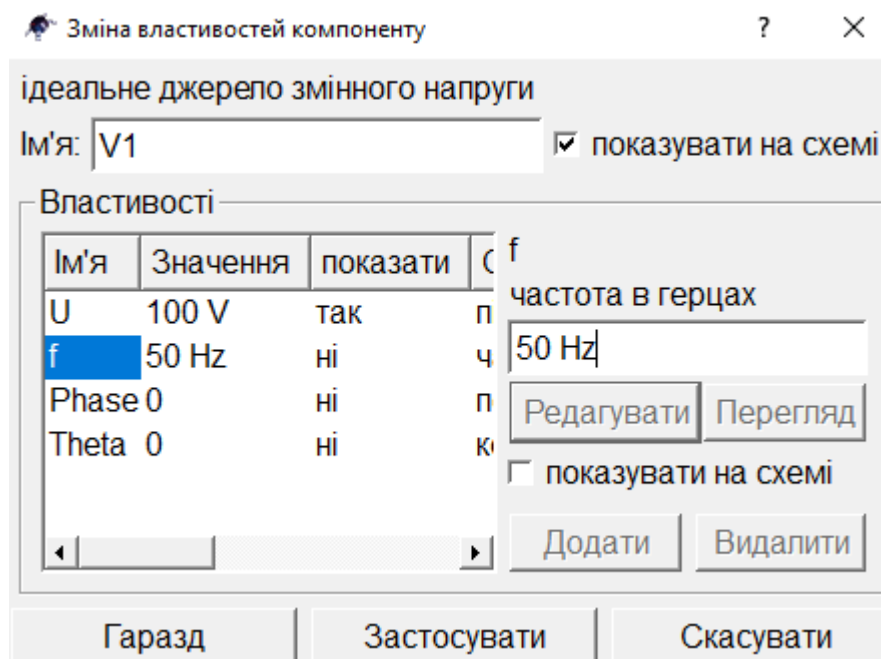


Рисунок 5.8 – Вікно налаштувань параметрів джерела напруги змінного струму

Параметри налаштування вимикача представлені на рис. 5.9.

Початковий стан визначає, чи замкнені контакти вимикача, а час зміни стану визначає, коли відбувається зміна стану.

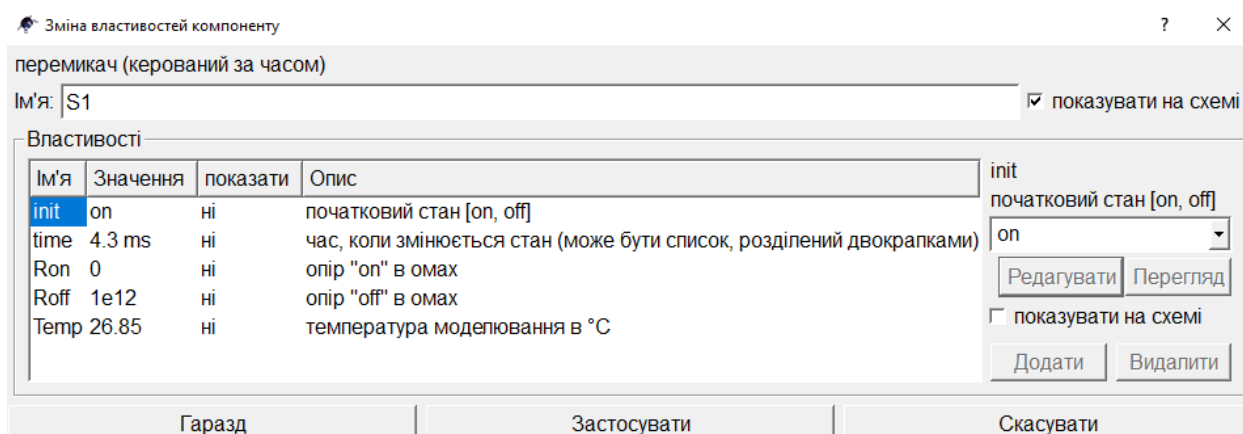


Рисунок 5.9 – Параметри налаштування вимикача

Налаштування властивостей активного опору (резистора) представлене на рис. 5.10 та має основне поле – значення опору. Числове позначення повинно супроводжуватись одиницями: Ohm, kOhm, MOhm, тощо.

Налаштування властивостей котушки індуктивності та конденсатора аналогічні налаштуванням властивостей активного опору.

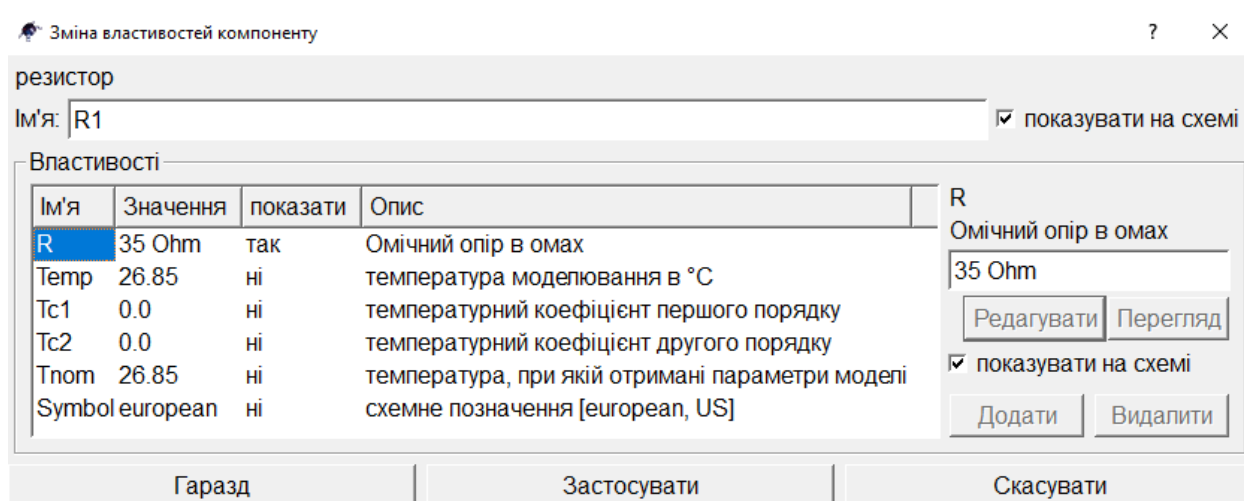


Рисунок 5.10 – налаштування властивостей активного опору в схемі

5.3. Завдання

Дослідити перенапруги на навантаженні, які відбуваються під час перехідного процесу відмикання навантаження. Порівняти рівень перенапруг та частоту коливань напруги, які виникають на навантаженні при вимиканні навантаження у довільний момент часу та в момент переходу струму в навантаженні через нульове значення. Для досліджень використати програмне середовище схемотехнічного моделювання Qucs в режимі дослідження перехідних процесів. Порівняти чисельні результати, одержані за допомогою схемотехнічного моделювання, з результатами розрахунків за теоретичними матеріалами (формулами) розділу 5.1 лабораторної роботи.

5.4. Порядок виконання роботи

5.4.1. Одержати від викладача шаблони файлів проекту схемотехнічного моделювання в програмному середовищі Qucs (тека, що містить файл схеми з розширенням .sch).

5.4.2. Відкрити відповідний одержаний шаблон файлу схеми в програмному середовищі Qucs.

5.4.3. На робочому полі відкритого файлу (позначене 6, у відповідності до рис. 5.4) змінити властивості елементів схеми, у відповідності до варіанту завдання, використовуючи контекстне меню відповідних елементів. Файл схеми містить одночасно дві схеми: комутація за допомогою вимикача у довільний момент часу та комутація за допомогою тиристора.

5.4.4. Обрати границі діапазону досліджень перехідного процесу від 0 до 1-2 періодів основної частоти джерела живлення. Початкову кількість точок на графіку обрати рівною 1000. При наступних дослідженнях, за необхідності, можна регулювати кількість точок на графіку або крок дискретизації моделювання у часі для одержання більш точних результатів.

5.4.5. Обрати момент вимикання вимикача в обох схемах в будь-якому місці діапазону досліджень за п. 5.4.4.

5.4.6. Параметри налаштування тиристора та вимірювача струму не змінювати!

5.4.7. Зберегти всі файли проекту.

5.4.8. Запустити процес моделювання перехідних процесів у двох електричних колах і дочекатись завершення процедури моделювання. По завершенні процедури моделювання відкриється нова вкладинка 5 за рис. 5.4, яка відповідає файлу результатів моделювання (файл з розширенням .dpl). Якщо розрахунок по шаблону схеми виконувався вперше, на панелі 1 за рис. 5.4 відобразиться зміст можливих видів відображення результатів («діаграми»). Необхідно обрати «Декартова» та перетягнути її на порожнє поле відкритого файлу результатів. Якщо файл з розширенням .dpl для даного проекту вже існує, його зміст буде відображено по завершенню розрахунків моделювання.

5.4.8. У властивостях графіку у декартовій системі координат додати в поле «Крива» за рис. 5.7 подвійним кліком миші дані «U_Load.Vt» з вкладинки «Набір даних». Виділити строку «U_Load.Vt» в полі «Крива» та змінити (за необхідності) її колір, тип та товщину. Обрати для цієї кривої значення «Ліва вісь» для поля «Вісь Y». Додати в поле «Крива» за рис. 5.7

подвійним кліком миші дані «Pr1.It» з вкладки «Набір даних». Виділити строку «Pr1.It» в полі «Крива» та змінити (за необхідності) її колір, тип та товщину. Обрати для цієї кривої значення «Права вісь» для поля «Вісь Y». Закрити вікно налаштувань відображень графіку результатів. Якщо файл з розширенням .dpl для даного проекту вже існує, пропустити даний пункт.

5.4.9. Перетягнути з панелі 1 за рис. 5.4 ще одну декартову діаграму для відображення результатів моделювання за другою схемою (див. п. 5.4.8.). Якщо файл з розширенням .dpl для даного проекту вже існує, пропустити даний пункт.

5.4.10. За необхідності, відкрити вікно налаштувань кожного графіку відображення результатів моделювання за відповідними схемами та змінити діапазони відображення сигналів напруги та струму, у відповідності до рис. 5.6.

5.4.11. За допомогою проставлення маркерів на осцилограмах моделювання напруги і струму у відповідному електричному колі визначити амплітудні та часові характеристики напруги або струму у відповідних характеристичних точках графіків. Кількість значущих цифр, що відображаються в маркерах (за замовчанням – 3) змінюється в контекстному меню маркера.

5.4.12. За допомогою формул підрозділу 5.1.1 визначити частоту згасаючих коливань напруги на навантаженні після спрацьовування вимикача, тривалість перехідного процесу до зменшення амплітуди коливань до 1% від максимального значення та максимальну амплітуду згасаючих коливань. Порівняти одержані розрахункові значення з результатами моделювання.

5.4.13. Перейти до вкладки схем моделювання та змінити час відмикання навантаження таким чином, щоб одержати момент комутації за наступних умов:

- а) мінімальне значення струму в навантаженні;
- б) максимальне значення струму в навантаженні;

- в) мінімальне значення напруги на навантаженні;
- г) максимальне значення напруги на навантаженні.

Виконати моделювання перехідних процесів при комутації навантаження для кожної з умов, наведених в п. 5.4.13 та порівняти результати математичного моделювання з теоретичними розрахунками параметрів електричного кола.

5.4.14. Зробити висновки про особливості комутації електрообладнання за допомогою напівпровідникових комутаційних пристроїв та механічних комутаційних пристроїв, що дозволяють виконувати комутацію електричних кіл в момент проходження струму через «нуль».

5.5. Варіанти виконання завдання

№ варіанту	Напруга джерела, В скз	Вхідна ємність, нФ	Вхідна індуктивність, мГн	Вхідний опір, Ом
1	100	68	150	350
2	150	44	210	300
3	220	22	180	450
4	250	56	100	400
5	1000	56	200	400
6	1200	34	220	350
7	1500	22	190	450
8	1600	22	56	250
9	1800	72	160	400
10	2200	86	230	350
11	2400	90	320	450
12	3600	98	350	500
13	4500	100	300	500
14	6000	120	320	550
15	4500	120	280	450

16	3600	85	220	450
17	2400	80	200	600
18	2200	88	160	650
19	1800	72	180	550
20	1600	80	46	650
21	1500	68	200	550
22	1200	66	140	600
23	1000	54	170	650
24	250	46	180	550

5.6. Контрольні питання

1. Що є причиною виникнення перенапруг при комутаційних операціях?
2. Чому в сучасних вимикачах перенапруги під час операцій розмикання електричного кола з переважно індуктивним навантаженням є, практично, мінімальними?
3. Які параметри навантаження визначають частоту затухаючих коливань при відключенні такого навантаження від джерела живлення напруги змінного струму?
4. Чим відрізняються процеси вимикання навантаження за допомогою вимикача з дугогасною камерою та вимикача на основі напівпровідникових елементів?
5. В якому випадку співвідношень параметрів навантаження після відключення навантаження від джерела живлення відбувається процес експоненційного спадання напруги на навантаженні замість затухаючого коливального процесу?
6. Для яких цілей призначений програмний пакет Qucs? Опишіть основні можливості даного програмного пакету, що використовуються в роботі?
7. Яким чином в результатах розрахунку, виконаних в програмному пакеті Qucs, можна графічно відобразити певну ділянку залежності напруги або струму від часу?

8. За допомогою яких інструментів в програмному пакеті Qucs можна одержати чисельні значення з графічних залежностей результатів моделювання?

9. Яким чином можна збільшити точність математичного моделювання параметрів електричного кола в програмному пакеті Qucs?

10. Чому моделювання комутаційних операцій з нелінійним навантаженням дає більш високі рівні перенапруг, ніж ті, що реально мають місце при відключенні навантаження за допомогою вимикачів?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В.О. Бржезицький, В. Ц. Зелінський, П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко Електричні апарати: підручник / [Бржезицький В. О., Зелінський В. Ц., Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є.]. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2016. – 602 с.
2. Клименко, Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник (видання друге, допрацьоване та доповнене). – Харків: Вид-во «Точка», 2013. – 400 с.
3. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения/ Под ред. В.В. Афанасьева.- Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1987. – 544 с.
4. Чунихин А.А., Жаворонков М.А. Аппараты высокого напряжения.- М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
5. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ «ХПІ» – Торнадо, 2005. – 925 с.
6. Иерусалимов М.Е., Ильенко О.С., Козюра В.Н., Соколовский С.А. «Исследование импульсных характеристик штыревых изоляторов» // Техническая электродинамика. – 1983. – №5. – с. 3 – 9.
7. Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В.Страхов Основы теории цепей. Учебник для вузов. Изд. 4-е, переработанное. М., «Энергия», 1975., 752 с.
8. Балаков, Ю.Н. О достигнутых параметрах выключателей / Ю.Н. Балаков, Б.Н. Неклепаев, А.В. Шунтов // Электрические станции. – 1996. – № 10. – с. 56 – 60.
9. Лафферти Дж. Вакуумные дуги: пер. с англ. - М.: Мир, 1982. - 432 с.
10. <http://qucs.sourceforge.net>
11. <http://leg.co.ua/arhiv/podstancii/sravnenie-vakuumnyh-i-elegazovyh-vyklyuchateley-srednego-napryazheniya-2.html>

12. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита; Учебник для студ. спец. «Электрические машины и аппараты»/ Под ред. А.Г. Соскова.- К.: Каравелла, 2005. – 344 с.